

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 20 公分翼展以下之拍翼式微飛行器的縮小化與減重研究(第 3 年)

### 研究成果報告(完整版)

計畫類別：個別型  
計畫編號：NSC 98-2221-E-032-025-MY3  
執行期間：100 年 08 月 01 日至 101 年 07 月 31 日  
執行單位：淡江大學機械與機電工程學系

計畫主持人：楊龍杰

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：林宗煌  
碩士班研究生-兼任助理人員：陳泓嘉  
碩士班研究生-兼任助理人員：李佳展  
碩士班研究生-兼任助理人員：辛宗訓  
碩士班研究生-兼任助理人員：葉富文  
碩士班研究生-兼任助理人員：方廷旗  
碩士班研究生-兼任助理人員：陳羿韶  
碩士班研究生-兼任助理人員：陳柏宏  
碩士班研究生-兼任助理人員：馮龍田  
碩士班研究生-兼任助理人員：徐智文  
碩士班研究生-兼任助理人員：王贊翔  
碩士班研究生-兼任助理人員：江逸偉  
碩士班研究生-兼任助理人員：呂傑文  
碩士班研究生-兼任助理人員：詹東霖  
碩士班研究生-兼任助理人員：葉星志  
碩士班研究生-兼任助理人員：梁家旗  
碩士班研究生-兼任助理人員：劉家誠  
碩士班研究生-兼任助理人員：林威仲  
碩士班研究生-兼任助理人員：鄭兆元  
博士後研究：高阿福

報 告 附 件 ： 出席國際會議研究心得報告及發表論文

公 開 資 訊 ： 本計畫可公開查詢

中 華 民 國 101 年 09 月 20 日

中文摘要： 本3年期個人型計畫目標，在於開發翼展20公分以下之拍翼式微飛行器(flapping MAV)的縮小化與減重技術。根據拍翼飛行生物之尺寸律(scaling law)，20公分翼展 MAV 對應之最大機重應只有20多克，10公分翼展 MAV 對應之最大機重更只有3克，在必須囊括機身、拍翼、與馬達機電動力來源等裝置下，減重工藝殊為不易。

眾皆耳聞的'微機電'(MEMS)技術，是縮小化之良方，然放眼目前已成功飛行的拍翼 MAV，MEMS 技術頂多用於機翼空氣動力效能提升等局部性之改善，對於立體全機之縮小化與減重，尚未提供全面性的因應。

再者，拍翼飛行牽涉之三維非定常空氣動力學與飛行力學研究，尚在方興未艾階段，如何進行拍翼機之飛行穩定控制，對於未來自主性 MAV 之發展至為重要，而現有機載電子通訊裝置過重，如何大幅減重到尺寸律範圍之內，仍保有控制的功能，便不只是單純 MEMS 技術可已解決，甚而要將技術觸角延伸到系統晶片。

是以本計畫擬定以下三個年度之工作進度目標：

第一年：翼展20公分以下之拍翼式微飛行器多元化機構與外形設計；

第二年：以微機電技術增益翼展20公分以下之拍翼式微飛行器及其研製；

第三年：以微機電與系統晶片技術增益翼展10公分級之拍翼式微飛行器改良。

預期將穩定滯空的拍翼 MAV，縮小翼展到10-20公分之間，並規劃完成自主式拍翼 MAV 的機載控制系統單晶片之架構。

中文關鍵詞： 拍翼式微飛行器，縮小化，減重，微機電，系統單晶片

英文摘要： The final goal of this 3-year project is to reduce the size and the body mass of a flapping micro aerial vehicle (MAV) with the wingspan less than 20 cm. According to the scaling law of natural flyers, the body mass of MAVs are recommended as only 20 g and 3 g related to the wingspan of 20 cm and 10 cm, respectively. It's quite a hard task of weight reduction to include fuselage, flapping wings, and motor-controlled module in such a small space or body mass.

As people know, MEMS technology is a good way to reduce size and weight both. However, the prior arts of flapping MAVs hardly use MEMS processing to solve all the construction problems except the part of

smart wing technique responsible to the aerodynamic improvement.

Meanwhile, the 3-dimensional unsteady aerodynamics and the corresponding flight mechanics of flapping MAVs are still not maturely developed. How to do the flight control and maintain the stability of flapping MAVs are very essential to the autonomous flight in the future. And the current 'heavy' microelectronics and electromechanical devices for implementing the avionics of MAVs can not been solved only by MEMS technology until the weigh reduction issue is simultaneously satisfied by the scaling law mentioned above. In other words, the system-on-a-chip (SoC) technology should be addressed and included in this project.

Therefore, we proposed the sub-targets of every year in this project:

In the first year, we commit to designing and constructing several kinds of flapping mechanisms and geometric configurations of MAVs ;

In the second year, we commit to delivering a flapping MAV of 20 cm wingspan with the help of MEMS technology ;

In the final year, we commit to delivering a flapping MAV with wingspan less than 20 cm (say, 10 cm) by MEMS, and propose the whole picture of the SoC layout suitable for out flapping MAV in the next stage.

英文關鍵詞： flapping MAV , miniaturization , weight reduction , MEMS , SoC

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫研究成果報告(完整版)

「20 公分翼展以下之拍翼式微飛行器的縮小化與減重研究」

## (Miniaturization and Weight Reduction of Flapping Micro Aerial Vehicles with Wingspan less than 20 cm)

計畫編號：NSC-98-2221-E-032-025-MY3

執行期間：98 年 08 月 01 日至 101 年 07 月 31 日

主持人：楊龍杰

E-mail: Ljyang@mail.tku.edu.tw

執行機構：淡江大學機械與機電工程學系

計畫參與人員：

高阿福(博士後研究員;以下皆碩士班兼任助理)、林宗煌、陳泓嘉、李佳展、辛宗訓、葉富文、方廷旗、陳羿韶、陳柏宏、馮龍田、徐智文、王贊翔、江逸偉、呂傑文、詹東霖、葉星志、梁家旗、劉家誠、林威仲、鄭兆元

## 目錄

1. 前言.....	3
2. 研究目的.....	3
3. 文獻探討與研究方法	
第一年.....	4
第二年.....	14
第三年.....	29
4. 結果與討論.....	45
5. 參考文獻.....	47
6. 國科會補助專題研究計畫成果報告自評表.....	51

## 1. 前言

淡江大學微機電研究群自 2003 年以來，以開發本土化的拍翼微飛行器(MAV)原型機為行動方案，連帶發展相關的製造、測試與分析技術，並廣納國內學界相關技術專長師長，一起交叉合作研究。96 與 97 兩年度先後獲航太學門補助各一年期的整合型計畫，在有限經費與時程中，已勉力完成系統整合的階段性任務，2008 年底之 MAV 飛行時間已延長到 343 秒，2010 年 MAV 飛行時間更延長到 480 秒。98 年度各子計畫恢復各自發展核心技術與計畫申請，繼續進行下一代 MAV 之發展，本三年期計畫(2009-2012)即主持人倡議的下一階段 MAV 整合製造應用研究。

## 2. 研究目的

本 3 年期個人型計畫目標，在於開發翼展 20 公分以下之拍翼式微飛行器(flapping MAV)的縮小化與減重技術。根據拍翼飛行生物之尺寸律(scaling law)，20 公分翼展 MAV 對應之最大機重應只有 20 多克，10 公分翼展 MAV 對應之最大機重更只有 3 克，在必須囊括機身、拍翼、與馬達機電動力來源等裝置下，減重工藝殊為不易。

眾皆耳聞的”微機電”(MEMS)技術，是縮小化之良方，然放眼目前已成功飛行的拍翼 MAV，MEMS 技術頂多用於機翼空氣動力效能提升等局部性之改善，對於立體全機之縮小化與減重，尚未提供全面性的因應。

再者，拍翼飛行牽涉之三維非定常空氣動力學與飛行力學研究，尚在方興未艾階段，如何進行拍翼機之飛行穩定控制，對於未來自主性 MAV 之發展至為重要，而現有機載電子通訊裝置過重，如何大幅減重到尺寸律範圍之內，仍保有控制的功能，便不只是單純 MEMS 技術可已解決，甚而要將技術觸角延伸到系統晶片。

是以本計畫擬定以下三個年度之工作進度目標：

**第一年：翼展 20 公分以下之拍翼式微飛行器多元化機構與外形設計；**

**第二年：以微機電技術增益翼展 20 公分以下之拍翼式微飛行器及其研製；**

**第三年：以微機電與系統晶片技術增益翼展 10 公分級之拍翼式微飛行器改良。**

預期將穩定滯空的拍翼 MAV，縮小翼展到 10-20 公分之間，並規劃完成自主式拍翼 MAV 的機載控制系統單晶片之架構。

**關鍵詞：**拍翼式微飛行器，縮小化，減重，微機電，系統單晶片

### 3. 文獻探討與研究方法

#### 第一年：翼展 20cm 以下之拍翼式微飛行器多元化機構與外形設計

隨著科技的進步，從螺旋槳飛機到現代音速以上的噴射式飛機的構型，可知飛行器的發展方向是速度快、質量輕、及具多元化功能。然而現今的飛行器，體積龐大且需要廣大的起降空間，而小型的微飛行器（micro aerial vehicle, MAV）具有造價低廉、隱密性高、易於攜行，可用於戰場敵情偵查；也可用在民生用途，如環境監測、路況回報或是災區探查等。在 2004 年 Raney 等<sup>1</sup>，以蜂鳥飛行機制為對象，設計製作拍翼式的仿生模型，透過振動設備控制翼尖擺動產生仿真軌跡，並利用發光二極體(light emitting diode, LED)，觀看拍翼式飛行器的翼尖軌跡，另將飛行器於不同參數下所產生的軌跡與蜂鳥拍翼軌跡進行比對，與蜂鳥在懸停、巡邏與倒飛時相近。在 2005 年 Żbikowski<sup>2</sup>研究昆蟲拍撲姿態運動，設計及製作一四連桿機構並導入關節，使拍撲機構能展現如昆蟲於懸停時之 8 字形拍撲功能 Tanaka 等<sup>3</sup>製作一翼展為 14 cm 之蝴蝶樣式之拍翼機(butterfly type ornithopter)，利用高速攝影機紀錄並分析不同重心位置對週期性拍撲之影響，及風洞可視化之渦流分析探討。2006 年 Lin 等<sup>4</sup>模擬及製作一簡單四連桿拍撲機構，搭配以塑膠薄膜為機翼蒙皮及碳纖維棒材為機翼骨架之撲翼機來模仿鳥類的拍撲運動，就飛行速度、傾角及拍撲頻率及升力之間的關係進行探討。在 2008 年 Henningsson<sup>5</sup>利用低速風洞，研究在不同的飛行速度下褐雨燕之飛行特性，並利用數位質點影像測速儀(digital particle image velocimetry, DPIV)，對其飛行時尾渦流進行觀測與分析。淡江拍翼式微飛行器發展團隊已具有多年的研究經驗及成果<sup>6 7 8 9 10 11 12 13 14 15</sup>。目前的拍翼式微飛行器-金探子已具有自由飛行，最長滯空時間達八分鐘的紀錄。本計畫即在此基礎下，朝低翼展、低重量及良好操控性方向發展。

在新型機構設計上，本年度朝兩個方向發展：第一個是以增加拍翼飛行器的操控性，以為未來擴展應用範圍之基礎；第二個方向，係以縮短機身，並試圖找出新的機身

<sup>1</sup> D. L. Raney, and E. C. Slominski, "Mechanization and control concepts for biologically inspired micro air vehicles," *J. of Aircraft*, Vol. 41, No. 6, pp. 11-14, 2004.

<sup>2</sup> Żbikowski, C. Galiński, and C. B. Pedersen, "Four-bar linkage mechanism for insectlike flapping wings in hover: concept and an outline of its realization," *J. of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 127 (4), pp. 817-824, 2005.

<sup>3</sup> H. Tanaka, K. Hoshino, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "Flight dynamics of a butterfly-type ornithopter," International conference on Intelligent Robots and systems, 02-06, Aug, 2005, pp. 310-315, 2005.

<sup>4</sup> C.-S. Lin, C. Hwu, and W.-B. Young, "The thrust and lift of an ornithopter's membrane wings with simple flapping motion," *Aerospace Science and Technology*, Vol.10 No. 2, pp. 111-119, 2006.

<sup>5</sup> P. Henningsson, G. R. Specdding, and A. Hedenström, "Vortex wake and flight kinematics of a swift in cruising flight in a wind tunnel," *J. of Experimental Biology*, Vol. 211, pp.717-730, 2008.

<sup>6</sup> L.-J. Yang, C.-K. Hsu, J.-Y. Ho, and C.-K. Feng, "Flapping wings with PVDF sensors to modify the aerodynamic forces of a micro aerial vehicle", *Sensors and Actuators A*, Vol. 139, pp. 95-103, 2007.

<sup>7</sup> L.-J. Yang, C.-K. Hsu, C.-K. Feng, J.-Y. Ho, G.-H. Feng, H.-M. Shih, and Y.-K. Shen, "A flapping MAV with PVDF-parylene composite skin," *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviations-Series A*, 39(3), pp. 195-202, 2007/09.

<sup>8</sup> L.-J. Yang et al, "The micro aerial vehicle (MAV) with flapping wings," Proc. IEEE ICM/ HIMA conference, 2005/07/07.

<sup>9</sup> L.-J. Yang et al, "A flapping MAV (Micro Aerial Vehicle) with PVDF-parylene composite skin", Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology, Singapore, 2006/06/26.

<sup>10</sup> L.-J. Yang et al, "Smart flapping wings with a PVDF sensor to modify aerodynamic performance of a micro UAV", Transducers & Eurosensors'07, The 14th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Lyon, France, June 10-14, 2007.

<sup>11</sup> L.-J. Yang et al., "Surface tension-driven micro actuator to micro aerial vehicles (MAVs)," APCOT-2008, Tainan, TAIWAN, p. 97, Jun. 23-26, 2008.

<sup>12</sup> L.-J. Yang et al., "A biomimetic figure-of-eight flapping of micro aerial vehicles (MAVS) illuminated by LEDS," APCOT-2008, Tainan, TAIWAN, p. 145, Jun. 23-26, 2008.

<sup>13</sup>馮國華，「拍撲式微飛行器之製作改良及飛行訊號傳輸之整合」，淡江大學機電工程學系碩士論文，96 年 6 月。

<sup>14</sup>高敏維，「微拍翼機可撓翼之氣動特性實驗」，淡江大學機電工程學系碩士論文，97 年 6 月。

<sup>15</sup>徐振貴，「拍翼式微飛行器之設計、製作與測試整合」，淡江大學機電工程學系博士論文，97 年 6 月。



材料，以提升飛行器的耐久性，進而解決目前珍珠板機身在遭受撞擊時，機身可能斷裂的問題。另外，在測試時訊號獲得與判讀機制整體化對於縮短拍翼飛行器研發期程也是一個重要因素，本年度工作旨在建立一體化的量測訊號獲得、處理系統。最後一個目標，是將金探子與產學合作，透過教學型產品化的達成，將團隊發展飛行器應用於各級學校的科普活動中，以廣泛地啟發國內在拍翼式微飛行器發展的興趣。

### (1) 新型拍翼機構設計

#### ● 操控性機構

淡江微飛行器研發團隊研製的飛行器已具有自由飛行的能力。在本計畫中，為提升拍翼機的操控性，即在原基礎下，藉由改變機身的構型，在不改變整體外型下，透過一個安裝於尾端的微致動器，達到微飛行器飛行時可控制左、右轉向的目的。圖 1 所示為金探子(上)與轉向飛行器(下)的機身圖示。整體機身重量 8.24 克(圖 2 所示)。目前此機構經過測試，其最長滯空時間達 4 分鐘，但在小角度轉彎上的精度仍待提升。

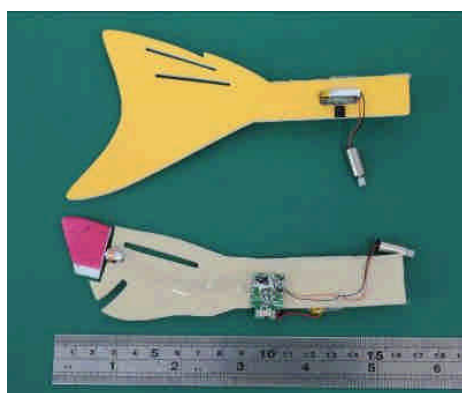


圖 1、原金探子機身(上)與轉彎金探子機身(下)



圖 2、轉彎金探子機身

#### ● 耐久性機身材料

為了控制拍翼機的機身總重符合飛行體尺度律的要求，在研發時選用了保麗龍，雖然達到了飛行的目的，然而保麗龍(EPS;發泡 PS)卻有一個缺點，其韌性不夠，以至於在飛行中，發生失速現象而墜落時，機身受到撞擊可能產生破裂，嚴重時甚至斷裂現象。這個現象會影響初學者投入金探子製作意願。為了改善這個問題，研發團隊在搜尋相關資料，並詢問專家學者後，發現 PE 發泡材的特性相當符合要求，可以取代原先的保麗龍機身，表 1 為材料特性比較表。經過測試，新的機身總重為 6.54 克(如圖 3 所示)。經過測試，此材質之機身能承受墜落時之撞擊且不會有斷裂的問題。



圖 3、新 PE 發泡材機身

表 1、機身材料特性比較表

單位	PE 發泡材	PS 發泡材 (原機身材質)
視密度 $\text{g/cm}^3$	0.030~0.034	0.032
抗張強度 $\text{kg/cm}^2$ (縱向)	2.2	無
抗張強度 $\text{kg/cm}^2$ (橫向)	1.3	
延伸率%(縱向)	150	無
延伸率%(橫向)	130	
壓縮永久變形率%	6.5	21.5
抗老化性	優	普通

### ● 合拍機制

合拍機制(clap-and-fling)是另外一種驅動拍翼的設計，為能了解合拍機制的氣動力及飛行效率，本研究另設計此不同於原金探子拍翼驅動四連桿機構並進行比較，探討兩者之間的差異性。

此設計由原先相同四連桿之作動方式加以改變，將其第三桿與基座的節點由兩端改為中心節點，並改變其拍撲位置，讓上方形成具有合拍機制的拍撲。而拍撲角度與金探子相似為  $50^\circ$ ，左右翼相位差則為  $5^\circ$ ，如圖 4 所示，編號為 CF-50。本研究另外設計編號 CF-51 與 CF-72 (未顯示)，共計三種合拍機構。以此三種合拍機構及金探子進行氣動力分析，相關特性參數如表 2 所示。

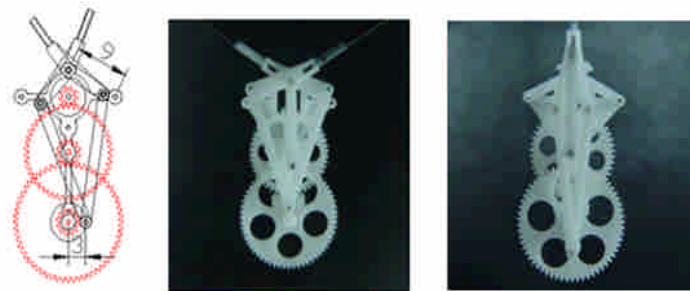


圖 4、合拍機制(CF-50)

表 2、金探子與合拍機構特性表

型式	金探子	CF-50	CF-51	CF-72
拍翼角	$52.8^\circ$	$50^\circ$	$51^\circ$	$72^\circ$
相位差	$3.2^\circ$	$5^\circ$	$2.7^\circ$	$3^\circ$
合拍	無	有	有	有

經風洞測試，傾角(inclined angle) $20^\circ$ 下推力係數( $C_T$ )、升力係數( $C_L$ )分別對應前進比(J)之相對關係，顯示於圖 5、圖 6。

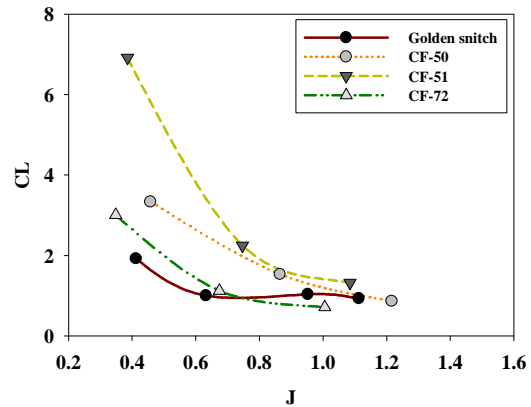
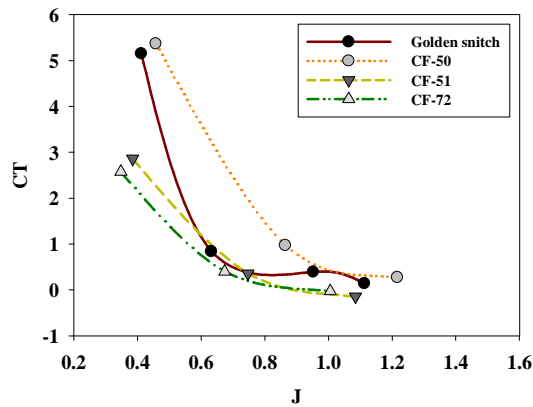


圖 5、傾角  $20^\circ$  下  $C_T$  值 vs.  $J$  的關係圖。 圖 6、傾角  $20^\circ$  下  $C_L$  值 vs.  $J$  的關係圖

參考圖 5，在  $J \geq 1$  時，四種機制之推力係數都落在 1 以下，隨著  $J$  值減少， $C_T$  值上升。 $J=0.8$  時，推力係數  $CF-50 > \text{金探子} > CF-51 = CF-72$ ； $J=0.6$  時，推力係數  $CF-50 > \text{金探子} = CF-51 > CF-72$ 。參考圖 6，在  $J \geq 1$  時，四種機構之升力係數都落在 2 以下，隨著  $J$  值減少， $C_L$  值上升。 $J=0.8$  時，升力係數  $CF-51 > CF-50 > \text{金探子} = CF-72$ ； $J=0.6$  時，升力係數  $CF-51 > CF-50 > CF-72 > \text{金探子}$ 。

#### ● 前後雙對拍翼與相位差效果

美國 Delaware 大學 Hu 與 Deng 教授，在其研製前後翼型拍翼機的論文中提到，當蜻蜓前後翼為同相位時，將會是往前加速飛行。反之，如果前後翼的相位差為  $180^\circ$  時，將會作懸停的動作[17]。因此本研究也試圖模仿蜻蜓，設計如前後對翼的拍翼機，初步製作了前後翼同相位與相位差  $180^\circ$  的拍翼機構。在設計上將前翼的曲柄長度調為後翼的二倍長，就能達到前後翼相位差  $180^\circ$  的拍翼目的。前後對翼拍翼機外型如圖 7 所示。圖 8、9 分別顯示前後翼同相位與相位差  $180^\circ$  機構，實際飛行時相位分析圖。

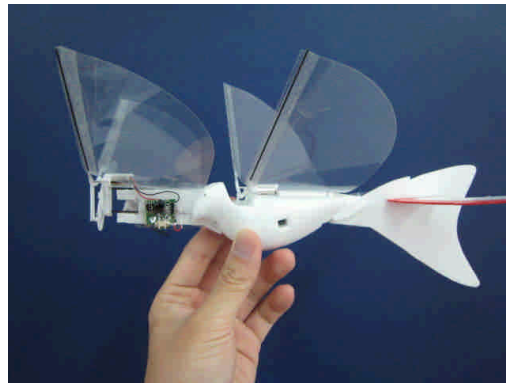


圖 7、前後對翼拍翼機外型

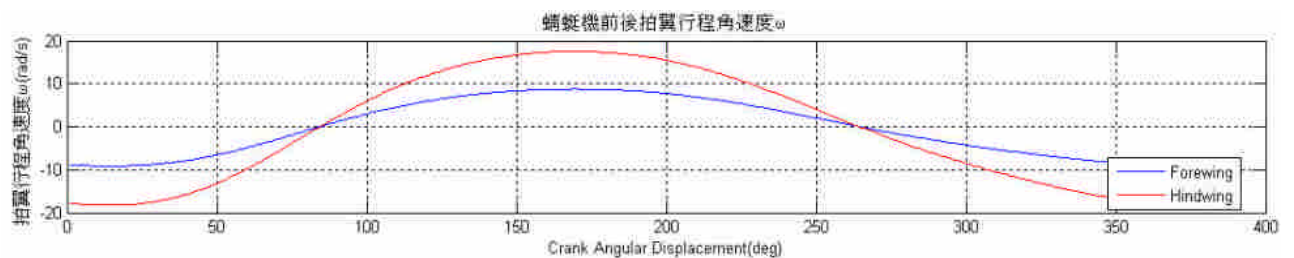


圖 8、前後翼同相位之拍翼相位分析

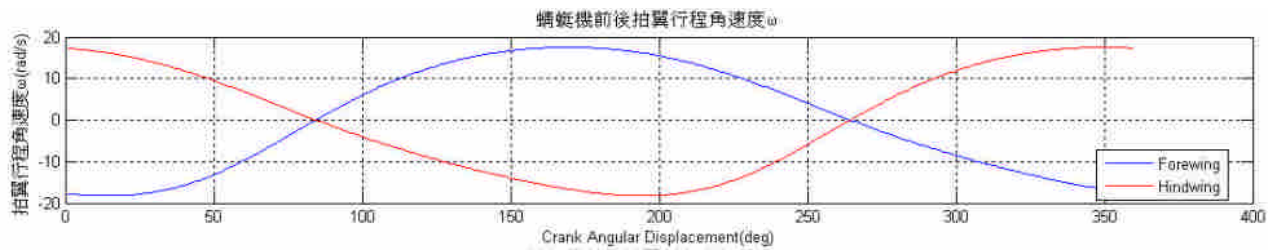


圖 9、前後翼相位差 180 度之拍翼相位分析

### ● 不同拍翼行程角

拍翼行程角(flapping stroke angle)的大小係由四連桿的驅動機構控制，圖 10 中 a、b、c、w 及 h 代表第一桿、第二桿、第三桿、寬度及高度。本研究經由改變第一桿(a)的長度，分別為 2.4 公分、3 公分、4 公分與 5.2 公分共四種尺寸，可達到 30.9°、39°、52.8° 及 70.6° 的拍翼行程角變化。藉由風洞測試，可分析不同行程角對其氣動力的效應。

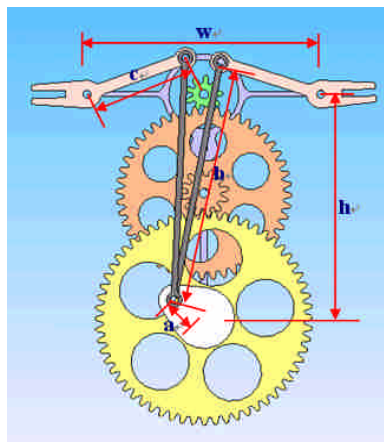


圖 10、拍翼驅動四連桿機構

當傾角 20°，四種拍翼行程角的升力都隨著頻率增加而上升，而升力值亦隨著主流速度的增加而變大。另外，當拍翼行程角 70.6° 時，其升力隨頻率提升而增加的變化曲線，相對於前述二個傾角有較明確的展現。另外，在同一個拍翼頻率情況下，以拍翼角 52.8° 具有較高的升力，與傾角 10° 的趨勢相同(圖未顯示)，但其他三個拍翼角的升力值則較接近，並無太大差異，如圖 11。

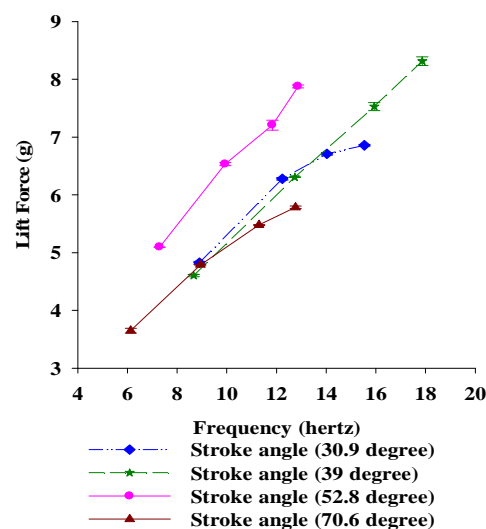


圖 11、傾角  $\alpha=20^\circ$ ，風速 2 m/s 時，頻率對四種拍翼行程角之升力變化圖

## 第一年：翼展 20cm 以下之拍翼式微飛行器多元化機構與外形設計

### (2) 拍翼軌跡的截取與影像處理

本研究利用實驗設備主要包含低速風洞、可變傾角夾治具、六軸力規、AM6501類比輸出放大器、DAQ(data acquisition)卡。為了能控制整個系統有一致的測試開始與終止時間，係利用LabVIEW軟體撰寫程式，以利控制拍翼的電源供應器，資料的擷取、紀錄及運算。

低速風洞規格：開路式；測試段大小，30cm×30cm×80cm；風速變化範圍，0-20m/s；以熱線式風速計量測風速，精度 0.1 mmAq。

六軸力規：由麥思科技代理，Bertec 公司生產，可量測升力 (lift)、阻力 (drag)、側向力 (side force)、仰矩 (pitch moment)、桶滾矩 (roll moment) 以及偏航矩 (yaw moment)。升力量測範圍為 $\pm 0.2$  kgf，側向力、阻力的量測範圍為 $\pm 0.1$  kgf。

本研究使用放大器的功能是将六軸力規內的壓力感測器接收訊號，等比例放大，並具有歸零作用。數據擷取卡(DAQ)的功能是接收放大器的類比電訊號，並將訊號轉換成數位資料再傳送至電腦儲存。另外，為了控制微飛行器的傾角，故將微飛行器架設於一可變傾角之夾治具上，再將微飛行器固定在六軸力規。風動測試流程圖，如圖 12 所示。

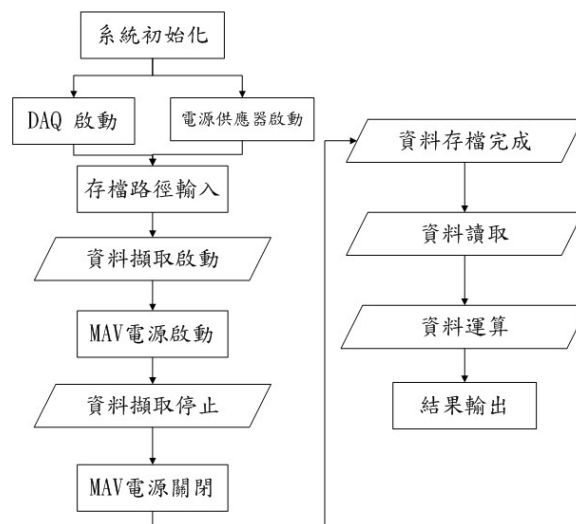


圖 12.風洞測試流程

圖 13 所示為透過煙風洞探討不同翼膜材質的渦流尾跡。經過比對，顯示鍍膜的可撓性導電翼膜，對於拍翼軌跡的影響並不明顯。再比較不同材質翼膜升推力差異，顯示升力最大誤差僅約 $\pm 0.4$ gf，推力最大誤差僅約 $\pm 0.15$ gf。

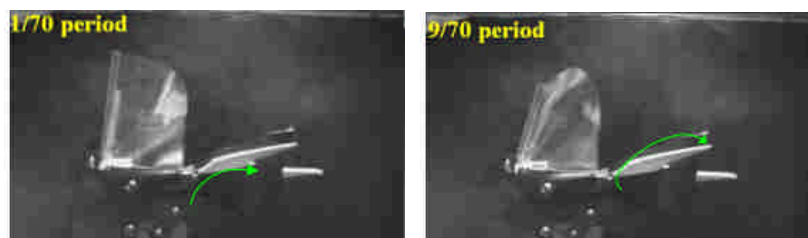


圖 13、煙風洞測試，飛行器翼膜渦流尾跡



## 第一年：翼展 20cm 以下之拍翼式微飛行器多元化機構與外形設計

### (3) 風洞氣動力數據之處理與判讀

圖 14 所示為風洞測試時，經由六軸力規所獲得即時數據，這些數據計過處理後，可以升、推力數值輸出，如圖 15 所示。

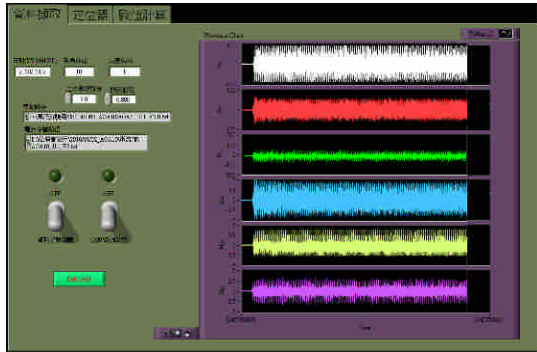


圖 14、六軸力規獲得之數據圖形介面

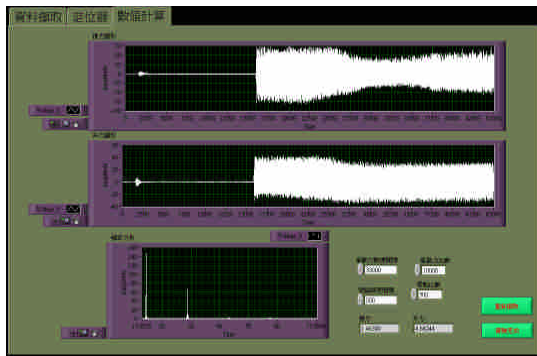
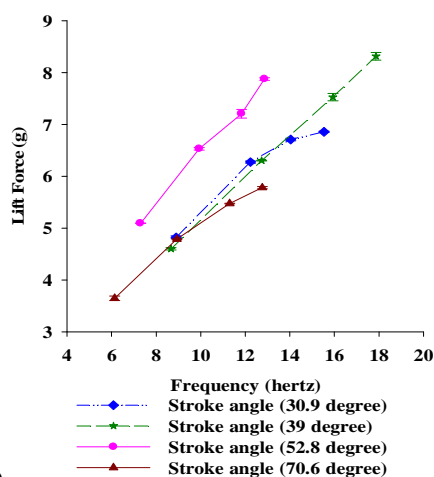
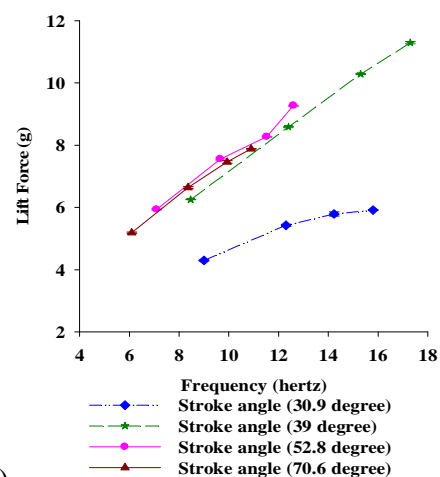


圖 15、風洞測試，推(上)、升(下)力

當傾角  $20^\circ$ 、 $30^\circ$ ，四種拍翼行程角的升力變化皆隨著頻率增加而上升；在相同拍翼頻率時，以拍翼行程角  $30.9^\circ$  的升力值最低，其他三個拍翼行程角的升力值則較接近。整體而言，在本研究測試傾角下，四個拍翼行程角的升力與頻率關係圖均具有正向線性關係的展現，如圖 16、17 所示。



(左)



(右)

(左)圖16、傾角 $\alpha=20^\circ$ ，風速3 m/s時，頻率對四種拍翼行程角之升力變化圖。

(右)圖17、傾角 $\alpha=30^\circ$ ，風速3 m/s時，頻率對四種拍翼行程角之升力變化圖。

## 第一年：翼展 20cm 以下之拍翼式微飛行器多元化機構與外形設計

### (4) 促成產學合作案與拍翼式飛行器之商品產出

#### ● 產學合作

因為金探子零件在設計上以教學型為方向，所以研發團隊經常透過與教育、學術等單位合作，辦理科普活動以推廣國內拍翼式微飛機的製作活動。在本期程計畫中舉辦活動有國科會五十科學之旅-與金探子共舞(如圖 18)、淡江員工子女寒假 MAV 科普營、台北市國中老師 MAV 科普營與 2010 年台灣無人飛機設計競賽---拍翼組(如圖 19、20)等活動，總計約 300 人次。這些活動參與成員包含各層級，有國小、國中、高中與大學學生與國中教師、大學教師等，相信透過這些活動的推動，已將拍翼式微飛行器的研究種子深深埋入參與人員的心中。這對於國內未來在拍翼飛行器的發展必有相當幫助。



圖 18、國科會五十科學之旅-與金探子共舞



圖 19、2010 年台灣無人飛機設計競賽---拍翼組全體參賽人員



圖 20、2010 年台灣無人飛機設計競賽---拍翼組比賽情況。

#### ● 研究成品產品化

為使獲得補助經費發揮最大功效，淡江微飛行器研發團隊不以完成研究成果為最終目標。為了將金探子讓國內學界能分享此成果，團隊更將金探子產品化，並以教學性產品為生產導向，以利於各級學校教師可以透過開發零件進行拍翼式微飛行器製作教學，

進而提升國內在拍翼飛行器研發的能量，及培育相關人才。

在產品化過程可概略劃分為各部零件的改良設計、模具製作及拍翼飛行機器人之組裝試飛等工作項目。金探子在研製時期使用的減速齒輪傳動機構是鋁合金 7075 材質，但放電線切割(electrical discharge wire machining; EDWM)加工繁瑣耗時(一個減速齒輪組加工時間超過 4 小時)，尺寸精度差異大。因此利用塑膠模具精密射出成型技術，製造出形狀複雜且尺寸精密的飛行塑膠套件，生產速度大幅提升(一分鐘射出一組)且成品品質一致。

「金探子」研究初期的 PET 翼膜是採用手工切割裁剪與塗裝，容易使翼膜邊緣產生殘留應力變形，影響雙翼升力之一致。經搜索商用可用技術，發現 PET 膜材一則可利用碳帶列印技術，進行翼膜美化與輪廓定義;二則引進(廣告)割字技術，透過專業的機台，使翼膜達成量產目的。為了克服機身單薄，解決零件外露問題，並將重心調整至最佳位置，設計燕子外型的機殼。機殼的設計流程圖從造型工業設計，機殼內部配置拍翼機構、電池及接收板，機殼模型打樣接著組裝試飛成功，然後開模量產。

整個系統的包裝盒也是關鍵，為使使用者便於攜行金探子，淡江團隊將所有零組件設計安裝於一個手提式的包裝盒內，下層放置遙控器、上層放置組裝好的拍翼飛行器，整體外觀如圖 21 所示。

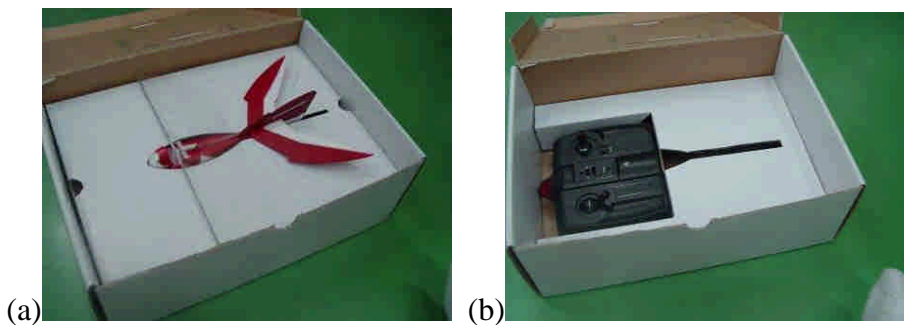


圖 21、盒裝金探子:(a)上層;(b)遙控器(下層)。



## 第一年：翼展 20cm 以下之拍翼式微飛行器多元化機構與外形設計

### (5) 遙控訊號即時傳輸監控

在氣動力訊號的分析中，除了風洞測試飛行器的升、推力外，若能獲得飛行器實際飛行的相關參數，對於研製期間相關問題的處理更有幫助。本年度已自行設計及製作接收模組(圖 22)，並撰寫程式對接收訊號進行分析與計算，即時擷取 MAV 在飛行時的油門紅外線訊號(圖 23)，並在擷取結束後，輸出文件檔(圖 24)，以利彙整各種飛行姿態的油門大小，藉以作為提升拍翼飛行器操控性的參考數據。



圖22 飛行器控制器(右)及訊號接收模組

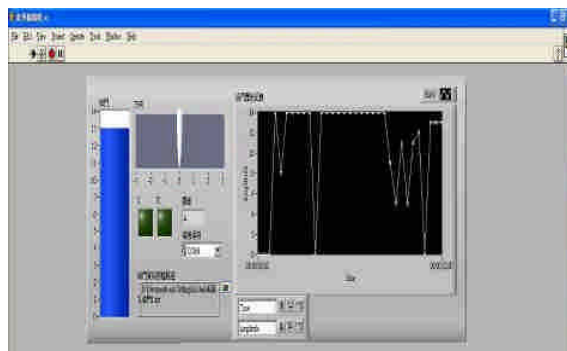


圖23 氣動力訊號與開關訊號比對示意圖

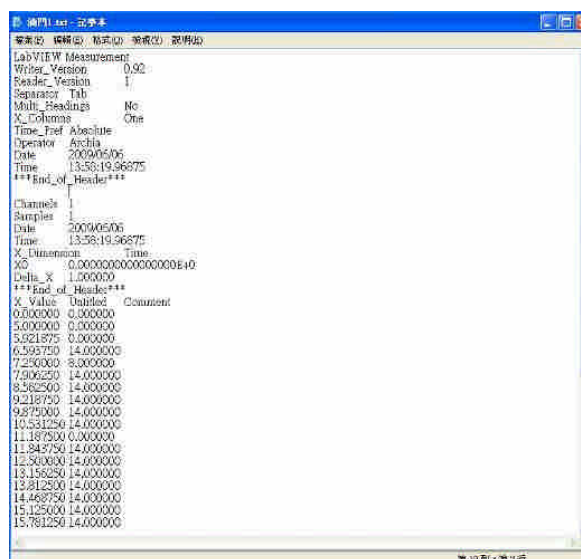


圖 24 飛行中相對油門大小

## 第二年：以微機電技術增益翼展 20 cm 以下之拍翼式微飛行器及其研製

拍翼式微飛行器(flapping micro aerial vehicles, FMAV)飛行原理是仿生，透過觀察自然界生物，製作出能模仿自然生物拍翼飛行的機構，用以分析生物在拍翼時的翼尖軌跡與翼膜<sup>16 17</sup>，已有許多研究指出鳥類翅膀上舉時翅膀會折疊，以減少不必要的反向升力<sup>18</sup>。蜜蜂、蜻蜓等昆蟲，拍翅方式則大多是 8 字形拍法<sup>19</sup>。而蜂鳥及蒼蠅的拍翼方式其軌跡為一橫躺的 8 字型，如同符號 $\infty$ ，尤其當其懸停於空中時<sup>20 21</sup>。從各種文獻中，了解目前在拍翼機的發展上，在翼展 20 公分以上的機型屬技術層次相對較成熟部份。在翼展小於 20 公分部份，因為穩定度問題，以雙對翼的發展較普遍，然而，就相同翼展而言在飛行速度上以單對翼的拍翼機較高。但要發展翼展小於 20 公分的拍翼機並不容易；此亦為本計畫開發之標的。

### (1) 建立拍翼式飛行器之機構設計資料庫

#### ● 不同拍翼行程角之影響

本研究量測對象計有四種拍翼行程角，傳動機構尺寸如圖 25。主流場速度由 0 至 3 m/s，每次增加 1 m/s；而微飛行器的拍翼頻率係由驅動馬達的輸入電壓控制，分別是 1.3、2.1、2.9 及 3.7 伏特。微飛行器的飛行攻角則由  $0^\circ$  至  $40^\circ$  (利用圖 26 夾具；第一年報告只粗淺探討 10 與 20 度攻角)，每次變化  $10^\circ$ 。依照研製經驗，拍翼驅動馬達的輸入電壓需在 2.9 伏特以上，所產生升力才能夠使微飛行器自由飛行，故本測試規劃驅動電壓範圍符合所需。摘錄部份研究結果(風速 2 m/s 為主)於下。

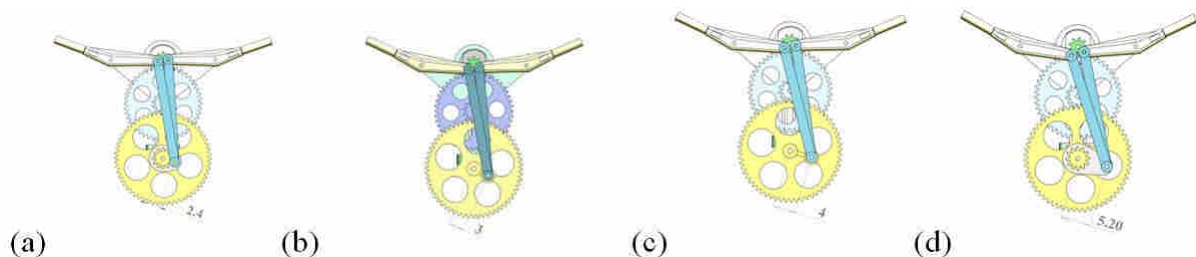


圖 25、四種拍翼行程角，只有第一桿長不同，分別是(a)30.9 度(2.4mm); (b)39 度(3mm); (c)52.8 度(4mm); (d)70.6 度(5.2mm)。其餘第二桿與第三桿皆為 20.3mm、9mm。

#### 1. 攻角 $10^\circ$

當攻角為  $10^\circ$ ，拍翼行程角 30.9°、39°及 52.8°之升力如圖 27 所示，明顯皆隨著拍翼頻率增加而變大；當拍翼行程角 70.6°時，升力雖然也隨著頻率增加而變大，唯趨勢不明顯，甚至微降。而當流速 0 m/sec(圖形因篇幅受限未檢附)，除了攻角 52.8°有明顯升力隨拍翼頻率增加而提升外，其他三種拍翼角的曲線變化較隨機。另外，在同一個拍翼頻率情況下，以拍翼角 52.8°具有較高升力，其次為 39°。圖 28 所示為當攻角等於  $10^\circ$ ，拍翼行程角與流速對應圖 27 之淨推力(所謂淨推力係指推力減去阻力；以下簡稱推力)

<sup>16</sup> M. H. Dickinson, F. Lehmann, and S. P. Sane, "Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight," *Science*, 284, pp. 1954–1960, June, 1999.

<sup>17</sup> A. R. Ennos, "The inertial cause of wing rotation in Diptera," *Journal of Experimental Biology*, 140, pp. 161–169, May, 1988.

<sup>18</sup> 蕭飛賓、王地寶、劉益仲，「何以飛的」，科學人電子雜誌，第 22 期 12 月號，pp. 40-41，2003。

<sup>19</sup> H. Tanaka, K. Hoshino, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "Flight dynamics of a butterfly-type ornithopter," *Intelligent Robots and Systems, (IROS) IEEE/RSJ International Conference*, pp. 310-315, 02-06, Aug, 2005.

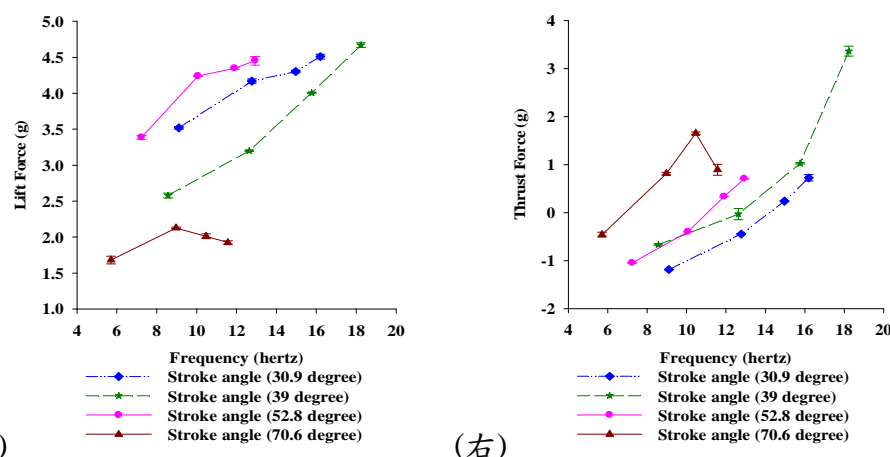
<sup>20</sup> D. Vîieru, J. Tang, Y. Lian, H. Liu, and W. Shyy, "Flapping and flexible wing aerodynamics of low Reynolds number flight vehicles," 44th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Paper No. 2006-0503, 2006.

<sup>21</sup> R. Zbikowski, "Fly like a fly," *IEEE Spectrum*, pp. 46-51, November, 2005.

與拍翼頻率關係。由圖中發現，當拍翼頻率在 10-12Hz 間，推力與拍翼行程角正相關。同時，頻率與推力之間亦正相關，但行程角 70.6°之推力在高頻會陡降。另外，當流速增加到 3m/s 時，可發現整體的推力漸減(圖形因篇幅受限未檢附)，甚至四種拍翼之推力值幾乎皆為負值，代表攻角 10 度之飛行速度(推力 0)皆小於 3m/s。



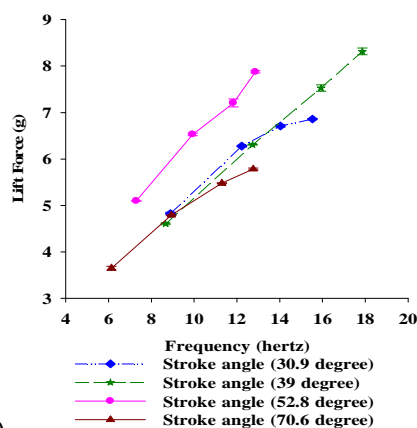
圖 26、可變傾角之夾具，中央 clamp 係用以夾住機身(可轉動)，右後方 clamp 用以夾住機身，調整攻角。



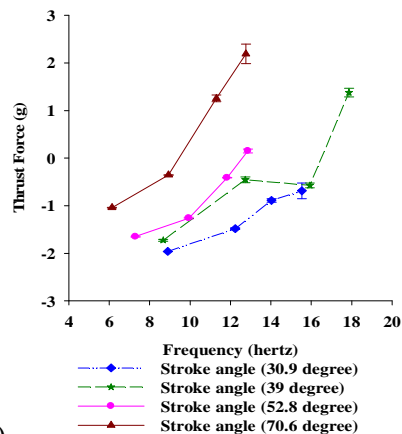
(左)圖 27、攻角  $\alpha = 10^\circ$ ，風速為 2 m/s 時，頻率對不同行程角之升力變化圖。  
(右)圖 28、攻角  $\alpha = 10^\circ$ ，風速為 2 m/s 時，頻率對不同行程角之推力變化圖。

## 2. 攻角 $20^\circ$

當攻角  $20^\circ$ ，四種拍翼行程角的升力(如圖 29)都隨著頻率增加而上升。另外，當拍翼行程角  $70.6^\circ$  時，其升力隨頻率提升而增加的變化曲線，相對於前述二個攻角較為明確。另外在同樣拍翼頻率下，拍翼角  $52.8^\circ$  具有較高的升力，與攻角  $10^\circ$  的趨勢相同，但其他三個拍翼角的升力值則較接近，並無太大差異。至於四種拍翼行程角的推力(如圖 30)仍隨拍翼頻率提升而增加，尤其當速度為 2m/s 及 3 m/sec(未檢附)時，特別明顯。但當流速較低時，高頻會造成推力下降，例如當拍翼行程角為  $70.6^\circ$ ，而頻率為 12Hz 時，推力明顯降低；當拍翼行程角為  $30.9^\circ$ ，而頻率為 16Hz 時，亦有類似情形。



(左)



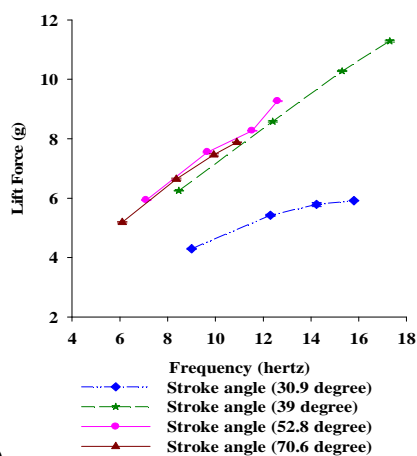
(右)

(左)圖 29、攻角  $\alpha=20^\circ$ ，風速為 2 m/s 時，頻率對四種拍翼行程角之升力變化圖。

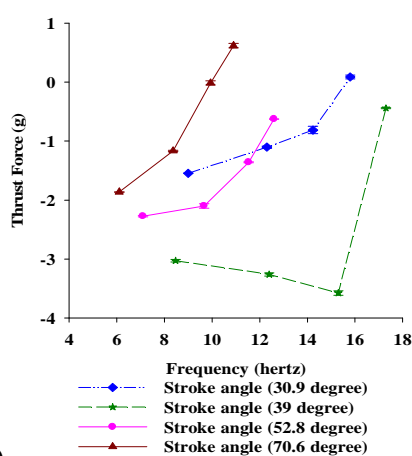
(右)圖 30、攻角  $\alpha=20^\circ$ ，風速為 2 m/s 時，頻率對四種拍翼行程角之推力變化圖。

### 3. 攻角 $30^\circ$ (已超過一般飛行器失速之攻角)

當攻角  $30^\circ$ ，四種拍翼行程角的升力變化皆隨著頻率增加而上升(如圖 31)；在相同拍翼頻率時，以拍翼行程角  $30.9^\circ$  的升力值最低，其他三個拍翼行程角的升力值則較接近。整體而言，當飛行器的攻角等於  $30^\circ$  時，四個拍翼行程角的升力與頻率均正相關。圖 32 為攻角  $30^\circ$ ，四種拍翼行程角，推力與拍翼頻率的關係。圖 32 顯示，推力基本上與頻率正相關，與攻角  $20^\circ$  趨勢類似；惟行程角  $39^\circ$  在高頻時會有陡降又回升之現象。至於其他三案之推力與頻率均正相關。



(左)



(右)

(左)圖 31、攻角  $\alpha=30^\circ$ ，風速為 2 m/s 時，頻率對四種拍翼行程角之升力變化圖。

(右)圖 32、攻角  $\alpha=30^\circ$ ，風速為 2 m/s 時，頻率對四種拍翼行程角之推力變化圖。

綜前所述，在相同拍翼頻率與攻角下，太大( $70.6^\circ$ )或太小( $39^\circ$ )的拍翼行程角產生的升力值較不穩定。當攻角增加時，四種拍翼行程角的升力均隨頻率增加而上升，但小行程角( $39^\circ$ )在高頻區也會發生升推力陡降狀況(原因可能是流場特性或機構運轉不順暢)。整體而言，在相同拍翼頻率下，以拍翼行程角  $52.8^\circ$  在各種攻角下之升力較高。而推力與頻率正相關的趨勢，以大行程角( $70.6^\circ$ )較劇烈，但表現最穩健的仍是  $52.8^\circ$ 。而此  $52.8^\circ$  行程角，恰為本研究單拍翼”金探子”之傳動機構設計。

## ● 合拍(clap and fling)機制之影響

合拍屬於飛行生物高升力性能之一，本次項目主要在了解合拍機制與”金探子”飛行之間的差異性。此地製作具合拍機制之微飛行器，只大幅改變傳動機構設計，其他機身、尾翼、翼膜等部分不變。

第一年度報告已簡要揭示過如何調整”金探子”的單對拍翼，使其在上行程末了時能產生擊掌的動作與初步量測成果。第二年度繼續報告不同機構設計和拍翼角度、位置設計，及其實際拍翼高速攝影之成果。本計畫共設計四種合拍傳動機構，如圖 33：

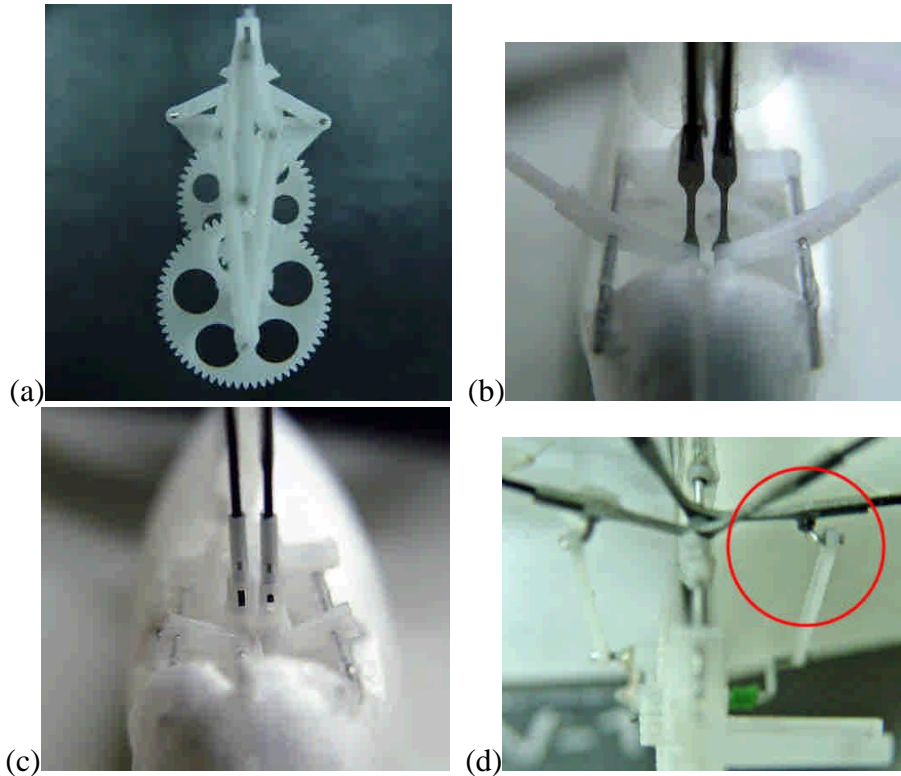


圖 33 不同之合拍傳動機構: (a)CF-50; (b)CF-51; (c)CF-72; (d)CF-110。

此四種設計與原金探子一併整理出拍撲角度、相位差、與合拍之有無，如表 3 之資料所示。至於升力表現，當拍翼頻率增高時， $CF-51 > CF-50 > CF-72 \approx$  金探子；推力表現，當拍翼頻率增高時， $CF-50 >$  金探子  $\approx CF-51 \approx CF-72$ 。至於 CF-110 因為在機身安裝於風洞夾具時出現結構不足之問題，暫無法取得升推力訊號。

此地合拍驅動機構的作動方式，會有左右翼相位角延遲(phase lag)的問題存在，如 CF-50、CF-51 與 CF-72。有鑑於此，CF-110 採用如同踩腳踏車之垂直式機構，可使 phase lag 歸零，並且齒輪接觸迎風面的總面積也相對縮減，減低了表面阻力。完成組裝之 CF-110 如圖 34。

表 3 拍翼機的拍撲角度、相位差、拍撲方式

Type	金探子	CF-50	CF-51	CF-72	CF-110
行程角	52.8°	50°	51°	72°	110°
相位延遲	3.2°	5°	2.7°	3.0°	0°
有無合拍	No	Yes	Yes	Yes	Yes



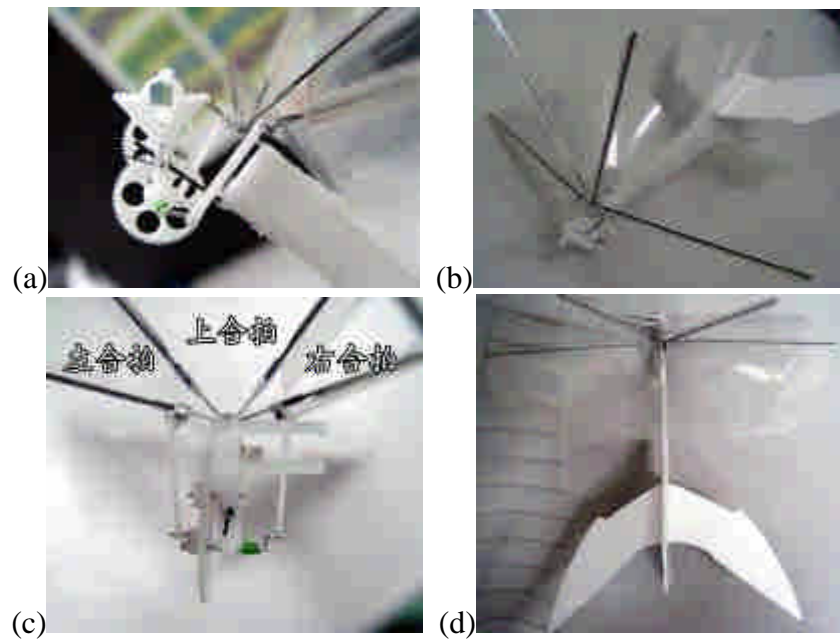


圖 34、(a)傳動機構區側視; (b)完整實體; (c)正視; (d)上視。

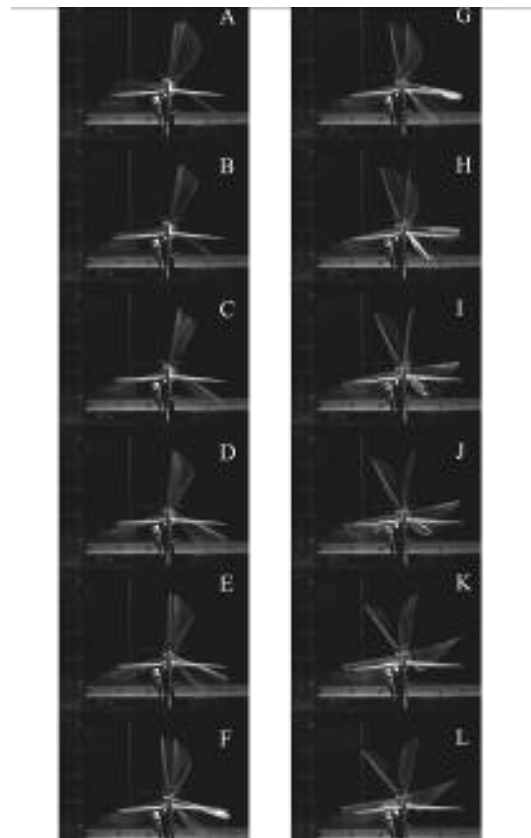


圖 35、CF-110 電壓 3.7 V 拍撲之高速攝影實景。

觀察 CF-110 雙對翼合拍機制(如圖 35 所示)，當上方兩端之翼膜靠近時，翼前緣跟翼後緣幾乎同時接近，這時翼前緣已經互相碰觸到，且稍微傾斜一邊；當下行程開始時，翼前緣先離開，翼後緣接觸非常短暫的時間後相互離開。左右兩端也會有 Clap and Fling 情形，但翼前緣無相互碰撞，兩端最近距離約 4 mm，而兩端 Fling 時，翼後緣也會有相互接觸一段時間後離開。圖 35 初步証實 CF-110 機構有合拍之動作，經實際試飛，升力遠大於其他設計，故能展現類似懸停(hovering)之飛行動作。

## ● 多對拍翼之影響

考慮到上下行程皆可有效利用，提高拍撲效率，故掌握前述合拍機制，延伸出新式多對拍翼之架構。其採用類似荷蘭德拉夫特技術大學(TU Delft)研究團隊 DelFly 之仿腳踏車機構，消除原先機構存在相位角延遲。此新機構在拍翼角度的設計上，也較先前機構簡單，並容易增加為雙對翼或者三對翼。圖 36 為三對翼設計圖與實體。

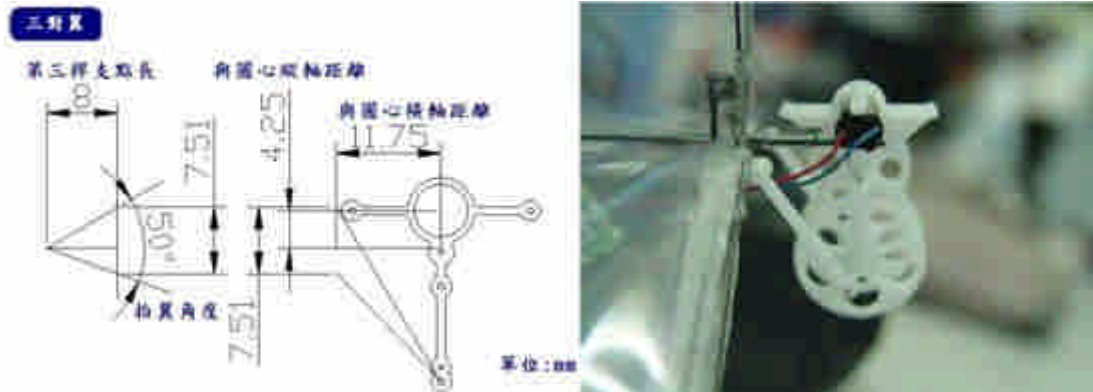


圖 36、腳踏車機構之三對翼設計。

將各元件組裝完成，如圖 37。實際試飛結果，三對翼微飛行器之翼展雖是 16 cm 以下，仍有足夠的升推力(尤其是升力)，也可以達到短暫滯空的飛行姿態。

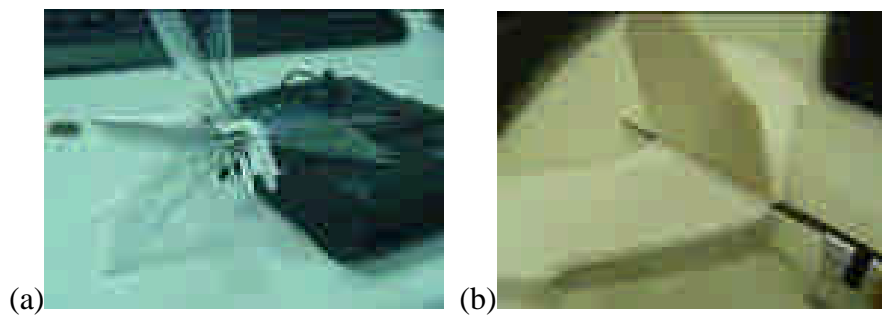


圖 37、(a)塑膠基座; (b)尾翼。

## 第二年：以微機電技術增益翼展 20 cm 以下之拍翼式微飛行器及其研製

### (2) MEMS 可撓 smart wing 研製與 LED 整合於拍翼

依循本研究群前幾年研製 parylene 機翼之經驗，採圖 38 方式及其微機電製作流程，如圖 39。由於鈦合金彈性模數為 113.8 GPa，故變形量小，對於八字拍翼較不利，故將鈦合金改以彈性模數為 1.8 GPa 之碳纖維棒取代，重新製作本研究需要之機翼。



圖 38、Parylene 機翼<sup>22</sup>

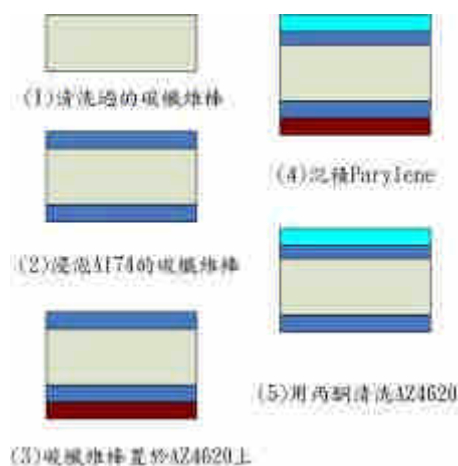


圖 39、Parylene 機翼之微機電製作流程。

圖 39 之 MEMS 加工程序，說明如下：

1. 黏貼一層黏性膠膜於碳纖維棒上，作為 parylene 的附著層。
2. 將已黏貼黏性膠膜之碳纖維棒置於 parylene coater 中進行第一層 parylene 薄膜的沉積。
3. 將沉積完 parylene 之碳纖維棒放置於超音波震洗機中加入異丙醇，以去除膠膜，最後再鍍上第二層 parylene。
4. 兩層 parylene 之總厚度包括 parylene 1 與 parylene 2 二層共計為 33 $\mu$ m。

2003 年，Raney 等以蜂鳥飛行機制為基礎，設計製作拍翼仿生模型(如圖 40)，採用三個自由度的大幅度拍翼，透過振動試驗設備控制翼尖振動產生仿真軌跡模擬，並利用發光二極體(light emitting diode, LED)的機制，觀看拍翼式飛行器的翼尖軌跡，並將飛行

<sup>22</sup> 何仁揚，「拍撲式微飛行器之製作及其現地升力之量測研究」，淡江大學機電工程學系碩士論文(指導教授楊龍杰)，2005 年。



器於不同變化參數下所產生的軌跡與蜂鳥拍翼軌跡<sup>23</sup>進行比對，達到近似蜂鳥的翼尖軌跡。

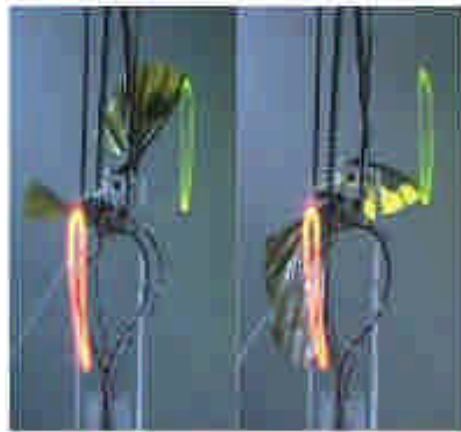


圖 40、仿蜂鳥仿生模型之 LED 翼尖軌跡顯像<sup>24</sup>。

本項目研究將對建構之拍翼機的翼尖軌跡進行初步研究，以了解與前述文獻是否具有類似機制。因拍翼頻率高，必須使用高速攝影機解析動作，購自 Vision Research 公司，型號 Phantom V4.2，內建 256MB 記憶體，可因應需求擴充記憶體，本研究使用為擴充至 1.25G 記憶體的攝影機，其效果在每秒一千張及畫面 512×512 之解析度下可拍攝 8 秒的影像<sup>25</sup>。

為了將拍翼軌跡完整記錄，提出以下實驗步驟來達到目的：

- (1) 在 MAV 翼尖上，拉線黏著一顆 SMD 型的 LED (圖 41)。
- (2) 在風速固定並將燈光全減下，以每 0.4V 為單位，從最小 0.9V 到最大 3.7V 之工作電壓拍動 MAV。
- (3) 使用相機做長時間的曝光拍攝以捕捉翼尖軌跡。其成果如圖 42。實驗參數為風速 3m/s，機身傾斜角 20 度。



圖 41、將 LED 黏貼於 MAV 翼尖。

<sup>23</sup> C. H. Greenwalt, Hummingbirds, Doubleday, Garden City, NY, pp. 57-86, 1960.

<sup>24</sup> D. L. Raney and E. C. Slominsky, "Mechanization and control concepts for biologically inspired micro aerial vehicles," AIAA Guidance, Navigation & Control Conference, Austin, Texas, August 11-14, 2003.

<sup>25</sup> Vision Research HIGH SPEED DIGITAL IMAGING SYSTEMS 產品資訊, Phantom V4.2 2010 年 6 月 18 日取自網址 [http://www.visionresearch.com/uploads/docs/Discontinued/V4/DS\\_v4x.pdf](http://www.visionresearch.com/uploads/docs/Discontinued/V4/DS_v4x.pdf)

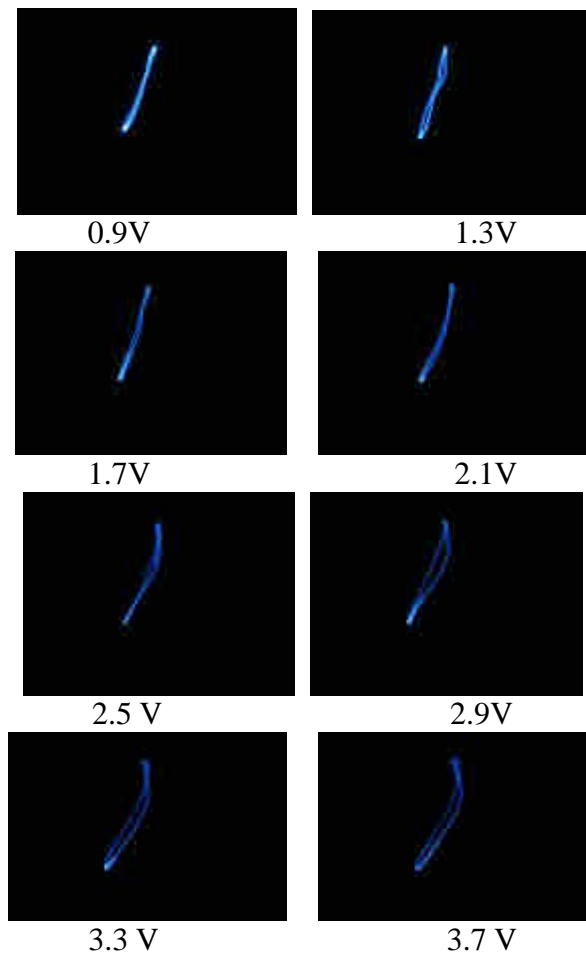


圖 42、風速 3m/s 各工作電壓之翼尖軌跡圖。

圖 42 之單點 LED 翼尖軌跡，只算是平面投影，8 字寬扁與觀測的角度有關。理想上是抓出 3D 立體軌跡。所以本計畫在 97 年度曾研製圖 43 之金屬線路佈局，與具有 9 顆 LED 晶粒之可撓性機翼，試圖抓出拍翼之即時 3D 立體軌跡，並獲國立體育大學教練研究所湯文慈教授的協助，運用其用於運動員姿態截取量測之 Kwon-3D 軟體與 Kwon-CC 標準尺(gauge)校正座標體系，串聯兩校各自提供之兩部高速 CCD，從兩個不同角度截取金探子 MAV 之拍翼活動影像，分別解析出低頻(0.3V 約 1Hz)與高頻(3.7V 約 14Hz)時，拍翼上九點 LED 之即時 3D 座標。本計畫第二年度利用 Matlab 與 Surfer 兩種軟體，將這些各時段之座標進行翼曲面逼近，整合繪出一個拍翼週期內之時變翼面曲面變化情形，如圖 44，就吾人所知，這是全世界首次針對(可成功飛行之)人造微型拍翼機，所抓取到真實作動的即時拍翼畫面，包含完整氣彈力(aero-elastic effect)或流固耦合作用(solid-fluidic interaction)的結果，本成果已發表於 2011 年 06 月 05-09 日(北京)之 IEEE Transducers-2011 國際會議<sup>26</sup>。

<sup>26</sup> L. J. Yang, I. C. Huang, Y. S. Chen, W. T. Tang, and A. B. Wang, "A parylene-LED wingbeating indicator for visual remote sensing," Technical Digest of the 16th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (**Transducers '11**), June 5-9, 2011, Beijing, China.

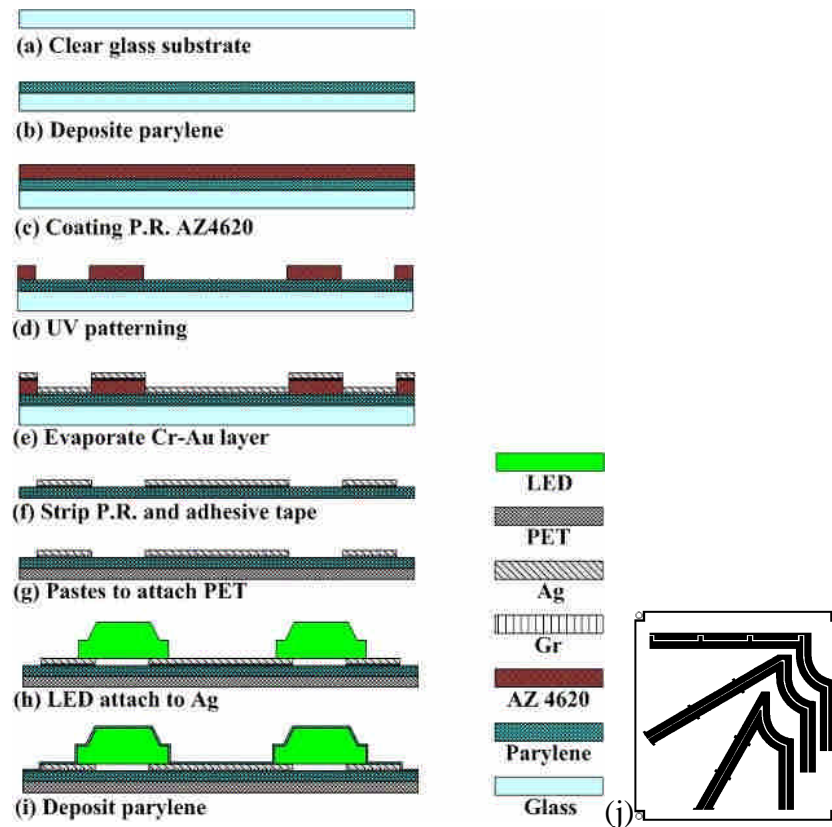


圖 43、Parylene 可撓性導電膜製程: (a)清洗玻璃片基板; (b)鍍 parylene; (c)旋塗光阻 AZ4620; (d)黃光微影定義光阻阻擋層圖形; (e)蒸鍍鉻-銀; (f)金屬掀離(lift-off); (g)黏貼於 PET; (h)黏貼 LED 晶粒; (i)鍍 parylene 包覆; (j)金屬線路佈局與 9 顆 LED 晶粒光罩。

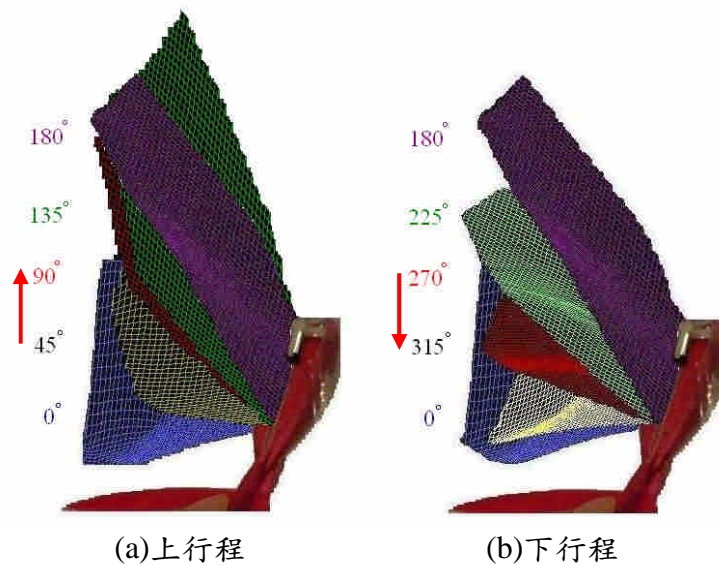


圖 44、一個拍翼週期內時變薄膜翼面之曲度變化情形(每 45 度相位一張立體圖像; 驅動電壓=3.7V): (a) 上行程(upstroke); (b) 下行程(downstroke).

## 第二年：以微機電技術增益翼展 20 cm 以下之拍翼式微飛行器及其研製

### (3) MEMS 仿生尾翼驅動器之研製

1994 年 C. Liu 等將面型微細加工技術 (surface micromachining) 結合高導磁合金<sup>27</sup>，接著於製作懸臂樑磁制動器<sup>28</sup>，並施以一外加電場，使該制動器彎曲  $65^\circ$  角位移。本團隊曾於 96 年度計畫工作中，考慮過數種高分子材料<sup>29 30 31 32 33</sup>，再總結提出以 SU-8 厚膜負光阻為制動面(control surface)材料之新構想。SU-8 適合製作出高深寬比且間隙窄的毛細(capillary)微結構，故能藉由表面張力(surface tension)為制動力來源，有效與黃光製程結合，而能於不消耗 MAV 電力同時，同樣能達到控制 MAV 尾翼姿態。當初的設計係將毛細驅動微型控制鉸鏈(hinge)，設定其上端成  $120^\circ$  之夾角，如圖 45。此一設計夾角即為 MAV 尾翼控制面之初始夾角，假設圖 45 左方之控制板為固定端，右方之控制板即為自由端，整合於 MAV 之構形如圖 23。當此毛細驅動微型控制鉸鏈之環狀毛細結構間注入工作液體(水)後，液體內聚力會緊縮毛細結構之間隙，使原始夾角由原先  $120^\circ$  增加，故圖 46 之升降舵(elevator)可由(a)之往上角度調平為(b)。

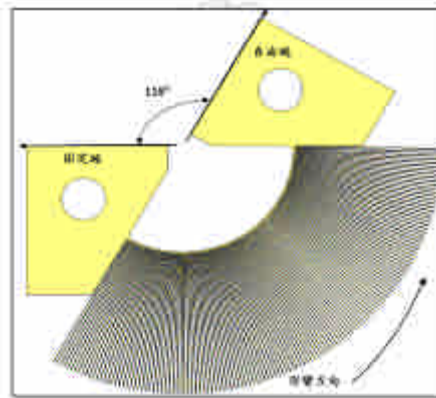


圖 45、毛細驅動微型控制鉸鏈控制角度示意。

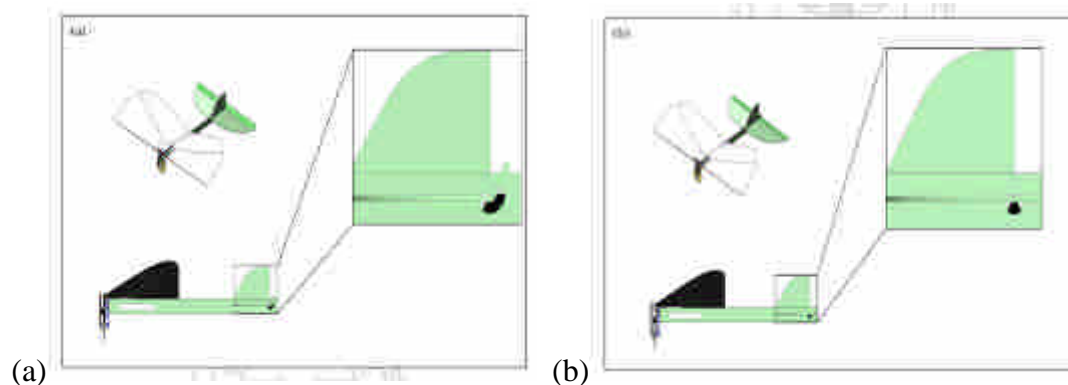


圖 46、結合 MAV 尾翼 elevator 之示意：(a)無工作液體驅動；(b)有工作液體毛細驅動後。

<sup>27</sup> J. Ai, Y. Gao, G. Yang, and F. Pan, "Micro-structure, nano-property and nano-tribological behaviour of the permalloy/copper multilayers," *Surface & Coatings Technology*, 201, pp. 5988–5993, 2007.

<sup>28</sup> C. Liu, T. Tsao, G. B. Lee, T. S. Leu, Y. C. Tai, and C. M. Ho, "Out-of-plane magnetic actuators with electroplated permalloy for fluid dynamics control," *Sensors and Actuators A*, 78 (2), pp. 190-197, 1999.

<sup>29</sup> J. Xie, X. Yang, X. Q. Wang, and Y. C. Tai, "Surface micromachined leakage proof Parylene check valve," *Proceeding of 14th IEEE MEMS'01*, pp. 539-542, 2001.

<sup>30</sup> 6.777J/2.751J Material Property Database, SU-8 Photoresist, <http://web.mit.edu/6.777/www/matprops/su-8.htm>

<sup>31</sup> M. P. Stoykovich, H. B. Cao, K. Yoshimoto, L. E. Ocola, and P. F. Nealey, "Deformation of nanoscopic polymer structure in response to well-defined capillary forces," *Advanced Materials*, 15, pp. 1180-1184, 2003.

<sup>32</sup> B. Samel, J. Melin, P. Griss, and G. Stemme, "Single-use microfluidic pumps and valves based on a thermally responsive PDMS composite," *Proceeding of 18th IEEE MEMS'05*, pp. 690-693, 2005.

<sup>33</sup> 陳虹吟, "非平面電極之研製及其微流體驅動之應用", 淡江大學機械與機電工程學系碩士學位論文, 2004 年 6 月。

本計畫初步以 SU-8 製作微型控制鉸鏈，其噴水霧驅動狀況如圖 47。首先以反夾式鑷子夾持住控制鉸鏈左端之控制板，其次將切割過之翼膜材質（PET 膜）邊緣沾附正光阻 AZ4620(圖上紅點部位)固定於右端後，以噴水霧方式添水制動，結果(b)圖顯示，已有明顯制動效果，且速度性能(0.5 秒以內)足敷 MAV 制動所需。基本上，SU-8 的剛性已符合尾翼角度毛細驅動之材料需求，但仍有質脆易損的問題，長遠來看仍應使用金屬。

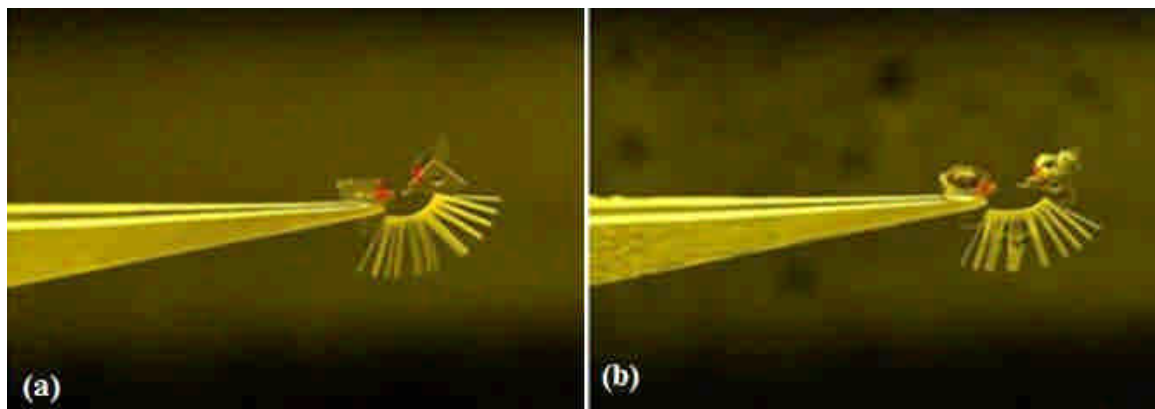


圖 47、SU-8 微型控制面鉸鏈噴水霧測試：(a)測試前尾翼面朝上；(b)噴水霧測試後尾翼面拉平。

本研究使用 40  $\mu\text{m}$  厚之 SU-304 不銹鋼箔材，其比 SU-8 材質強韌。微細加工部分，採 Nd-YAG 雷射之委外切割，經調整好雷射切割瓦數與掃瞄速度後，直接切出圖 47 或圖 48 之仿生梳狀微制動單元(bionic comb-shaped actuating unit)。最細之雷射切斷線寬為 50  $\mu\text{m}$ 。每一個微制動單元內含 50 組梳狀指叉(comb finger)。若整體制動力量不足，採多組制動單元整合安裝在同一尾翼操作面(control surface)上。整體操作方式如圖 48 所示。

圖 49 顯示本仿生鋼質尾翼制動器，在泡水前後之角度變化。圖 49(a-b)顯示泡水前後的尾翼制動角度行程為  $3^\circ$ ，遠小於一般飛行器操作面角度變化  $10\text{--}15^\circ$  之規格。經檢驗其表面沾濕情形(如表 4 所列接觸角數據)，SU-304 表面接觸角由雷射切割前之  $60.5^\circ$  親水(hydrophilic)狀況，變為切割後之  $105.5^\circ$  疏水(hydrophobic)狀況，故純水不易流入毛細縫中，制動力道較差。當吾人進行表面改質(surface modification)，於鋼質尾翼制動器表面鍍上 parylene 薄膜之後，表面又恢復成親水(接觸角  $68.7^\circ$ )，且原先毛細梳狀結構之 50  $\mu\text{m}$  間隙，可因著 10  $\mu\text{m}$  厚 parylene 膜之填塞，減少至 30  $\mu\text{m}$  間隙，而增大驅動力道與角度。本間隙縮小術(gap-shrinkage technique<sup>34</sup>) 有效地將仿生鋼質尾翼制動器之制動角度增大到  $10^\circ$ ，如圖 49(c-d)實驗結果所示。本研究曾繼續嘗試別的表面改質法，如氧氣電漿(oxygen plasma)處理，使鋼質尾翼制動器 parylene 表面變得更為親水(接觸角  $21.9^\circ$ )，但制動角度行程依然在  $10^\circ$  左右。

<sup>34</sup> X. Yang et al., *Sensors and Actuators A*, 73 (1999), pp.184-191.



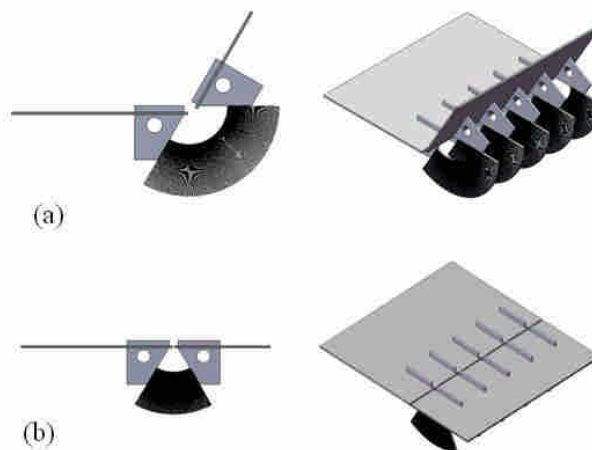


圖48. 改良毛細結構尾翼制動面之工作原理：(a)沒有工作液體時，控制面朝上(fl原因 up); (b)有工作液體時，控制面打平(fl原因 flat)。

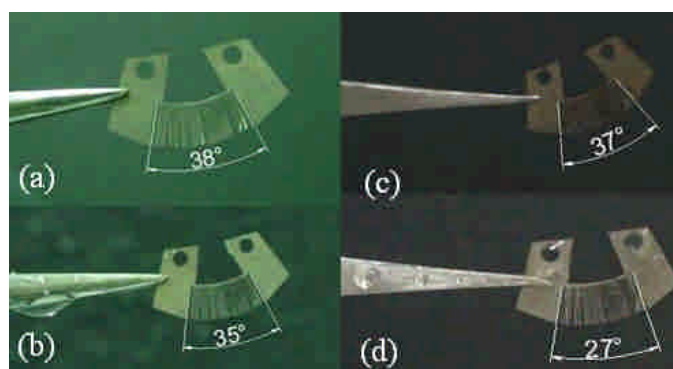


圖 49. 鋼質尾翼制動器之角度變化：(a)無水驅動情形；(b)有水驅動情形；(c) 鍍上 parylene 膜後之無水驅動情形；(d) 鍍上 parylene 膜後之有水驅動情形。

表 4. 鋼質尾翼制動器之表粗(surface roughness)與接觸角(contact angle)數據

	Steel		Steel coated with parylene	
	Before laser cutting	After laser cutting	No oxygen plasma treating	With oxygen plasma treating
Surface roughness (angstrom)	473	1405	541	832
Contact angle	60.5°	105.5°	68.7°	21.9°

## 第二年：以微機電技術增益翼展 20 cm 以下之拍翼式微飛行器及其研製

### (4) RF/IR 遙控晶片之規格訂制與 RF/IR 訊號傳輸記錄

控制機制是本拍翼機未來精確飛行的關鍵，經本校航太系蕭富元教授之協助，完成遙控回授系統包含接收模組、遙控器接收器(圖 50(a))與其電路板設計圖(如圖 50(b))之製作，藉由自撰程式的輔助，可將 MAV 在飛行時的油門(馬達轉速)紅外線訊號擷取下來(圖 51)，並在測試結束時，可將轉速與轉彎訊號之時變記錄輸出為文件檔，以方便對各種飛行姿態錄像，作為未來遙傳回授訊號之基礎。

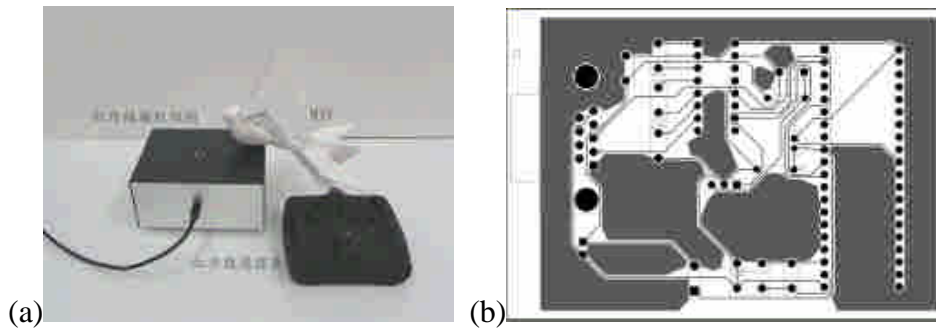


圖 50. (a)接收模組; (b)量測用接收電路板圖

另有關整合 MEMS 加速度計(accelerometer)或陀螺儀(gyro)等微型慣性感測器(inertial microsensors)於遙控系統晶片的規格制定，基本上可遵循以下流程：

- (1)慣性指令從地面站無線傳輸到機上接收;
- (2)指令與回授量測訊號之比對;
- (3)經由機上微處理器之內建飛行力學模式計算 MAV 油門或 MAV 控制面制動角度之輸出量;
- (4)機上油門或控制面進行 MAV 之制動;
- (5)機上 MEMS(數位)感測器量測慣性訊號;
- (6)機上數位轉類比;
- (7)訊號處理(如卡門濾波);
- (8)增益放大;
- (9)訊號回傳地面接收站顯示，同時在機上回授到步驟(2);...

這些整合 MEMS 慣性微感測器之回授控制電路，稱之”飛行資訊整合系統”(air data integration system; ADIS)，在較大尺寸之定翼式或旋翼式無人飛行載具(UAV)上，皆已實現。

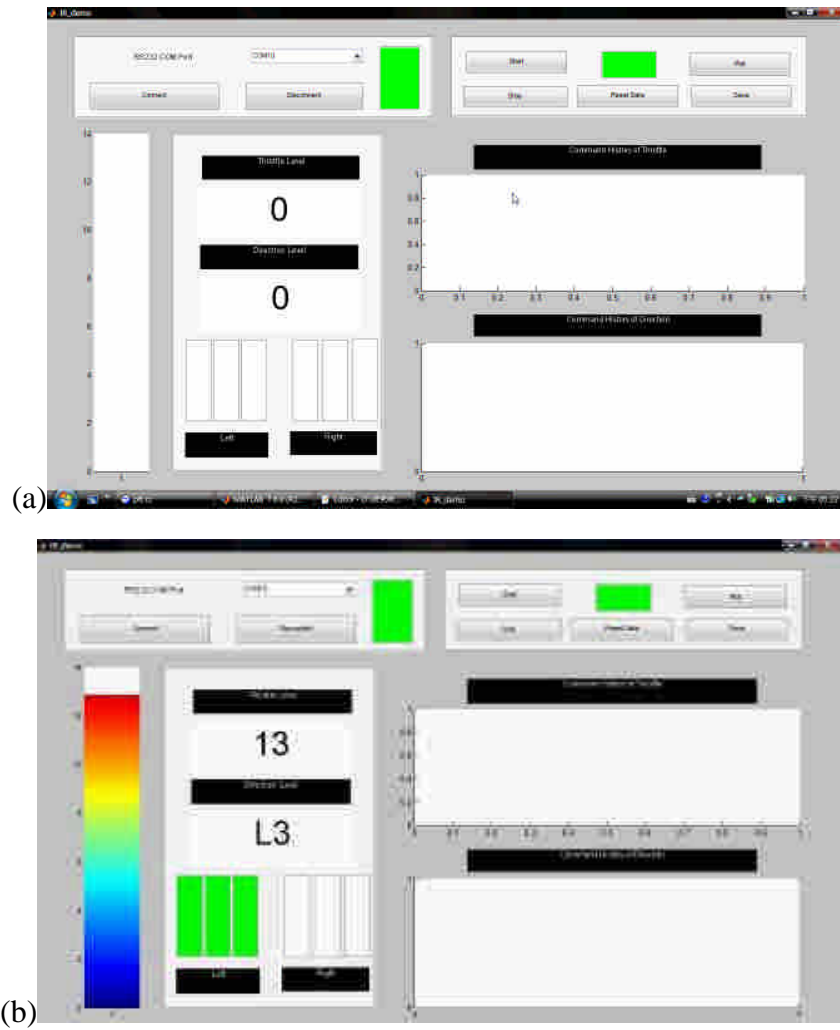


圖 51. MAV 飛行油門(馬達轉速與左右轉)人機介面: (a)無轉速與左右轉指令時; (b)下達轉速檔位 13 並左彎檔位 3 指令的情形。圖形介面之右側二圖為轉速與轉彎訊號之時變記錄，未來希望與即時錄像作比對。



### 第三年：以微機電與系統單晶片技術增益翼展 10 cm 級之拍翼式微飛行器性能

#### (1) 10 cm 級翼展之縮小技術開發

本研究擬結合空氣動力、機構、與飛行穩定控制等領域之理論或經驗公式，以比較富有依據之方式對微飛行器尺寸進行設計，並孜孜計較各部分零組件之重量分配，最終整合出總機重 4.28 克重之原型機，初步自由試飛之滯空時間為 6 秒鐘。本研究並分析風洞升推力之數據，與實際飛行姿態以及已發表之類似等級微飛行器進行比較，以驗證先前微飛行器設計之合理性。

表 5 為”10 公分微飛行器”之各零件重量，並針對各零件是否可以加以改良輕量化，分別進行探討與改良：

表 5. 本計畫 10 公分微飛行器各零件質量 [單位：g]

初版之 10 公分微飛行器 <sup>35</sup>		本研究是否可改良
馬達	1.66	否
電池	1.18	是
晶片	0.44	否
機構	1.02	是
機身		是
總質量	4.3	是

#### 機構部分

基座的材料選用鋁合金 6010，利用線切割放電加工(EDWC)，切割出一厚 2mm 鋁合金製的基座，如圖 5，之後再與其他零件，如圖 53 做組合，即完成本研究之傳動機構，如圖 54，總重 0.88g。



圖 52. 傳動機構基座

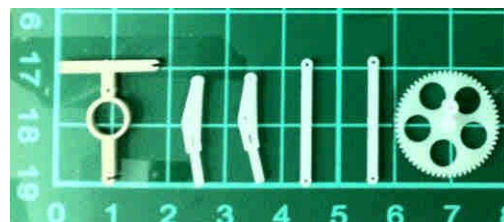


圖 53. 傳動機構零件

<sup>35</sup>廖俊瑋，「翼展 10 公分之拍翼式微飛行器研製」，淡江大學機電工程學系碩士論文，新北市，2009



圖 54. 傳動機構

### 機翼部分

本研究之翼膜面積如為  $2849.00 \text{ mm}^2$ ，將無法產生足夠的升力，與初版之 10 公分微飛行器翼膜各參數比較如表 6，由表 6 中可以歸納出，飛行器翼展  $b$  越小，則須要較小的展弦比( $AR = \frac{b^2}{S}$ )，故以此標準做範圍，設計了翼膜如圖 55，總面積  $S$  為  $3403.66 \text{ mm}^2$ 。

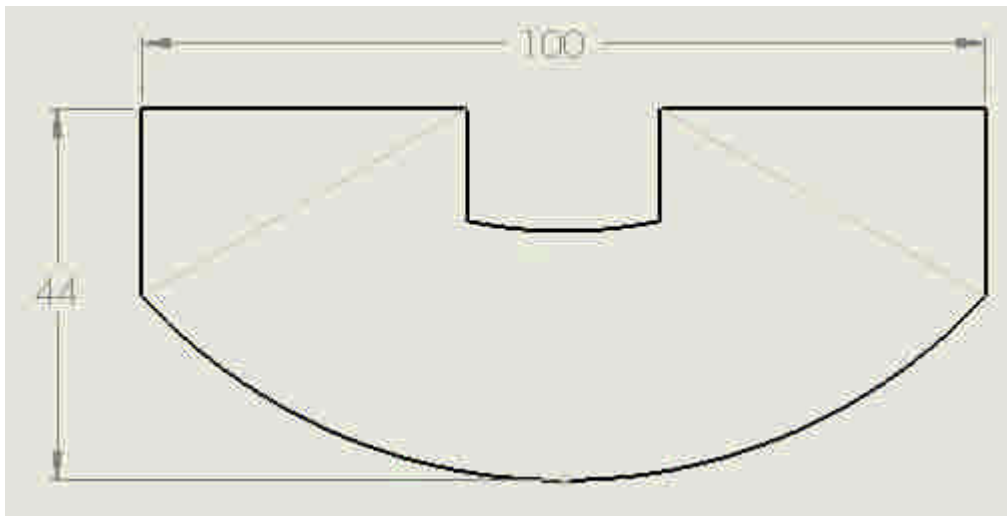


圖 55. 翼膜設計 (單位: mm)

表 6. 翼膜參數比較

	金探子	本研究群 10 公分微飛行 器初版設計	本研究計算最小翼面積
翼展 cm	20	10	10
翼弦 mm	65.00	41.13	42.00
翼面積 mm <sup>2</sup>	11404	3340.3	3237.2
展弦比	3.51	2.99	3.09

機翼材質選用膜厚 22μm 的 PET，由於微小化的關係，所以在製作上精細程度的程度都會影響飛行表現，為避免手工無法達到的精度，故委託校外公司使用切割機台加工出翼膜，切割完成之翼膜如圖 56。

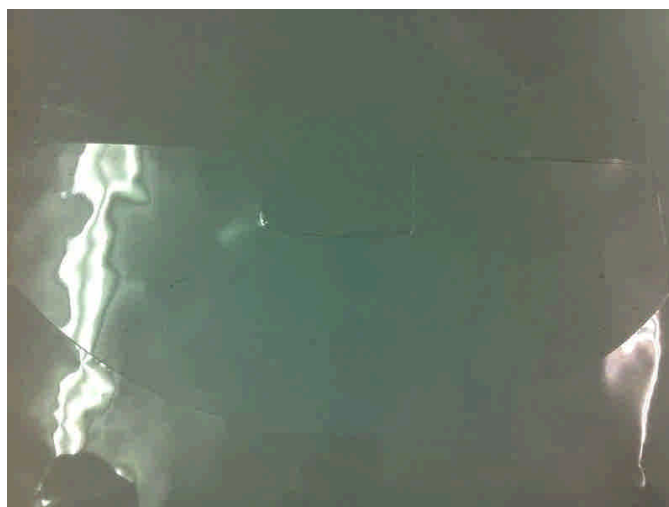


圖 56. PET 翼膜成品

### 機身部分

為了兼顧輕量化及強度的目的，機身材料選用直徑 0.6 mm、長度 65 mm 之碳纖維棒作為機身，圖 57 表示各零件與原點距離之參數示意圖，利用(1)式計算出之 C.G 值，如表 7。

$$C.G.(l) = \sum_{i=0} [M_i(g) \times X_i(l)] / M_{all}(g) \quad (1)$$

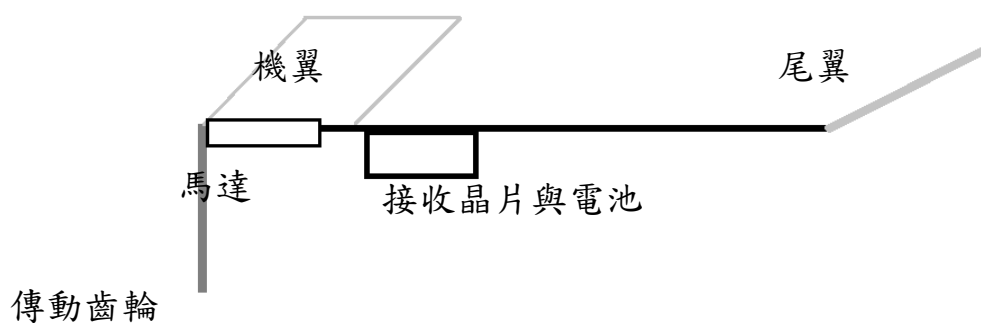


圖 57. 各零件位置示意

表 7. 質量中心計算

編號(i)	Name	Mi(g)	Xi(cm)	Mi × Xi(g × cm)
1	Motor	1.66	1.30	2.16
2	Battery	0.90	4.30	3.87
3	Receiver	0.44	4.30	1.89
4	Gear	0.88	0.50	0.44
5	Body	0.30	4.70	1.41
6	Tail	0.02	8.20	0.16
7	wing skin	0.10	2.60	0.26
Sum		4.30		10.19
C.G.=(10.19)/(4.30)=2.37 cm				

表 7 之計算結果，質量中心位於機身起點 2.37 cm 處，而升力位於 c/4 (c：翼弦；4.4 cm)，即 1.1 cm 處，本研究微飛行器屬於非穩態設計，恰符合飛行時高攻角之需求。

### 尾翼製作

當有了機翼及機身長度的計算，如圖 58，來求出適合的尾翼尺寸，經計算後求得尾翼升力為 12.07 g，將尾翼升力代入(2)公式

$$S = \frac{2L}{\rho V^2 C_L} \quad (2)$$

可求得尾翼最小面積為 996.48 mm<sup>2</sup>，並以此面積為標準設計出尾翼面積為 1170.55 mm<sup>2</sup> 之尺寸，如圖 59，也是如同機翼一樣由委外廠商切割。因計算尾翼升力時，此升力結果為假設飛行時攻角 20° 的情況，所以最後製作尾翼時需與機身夾 20°。

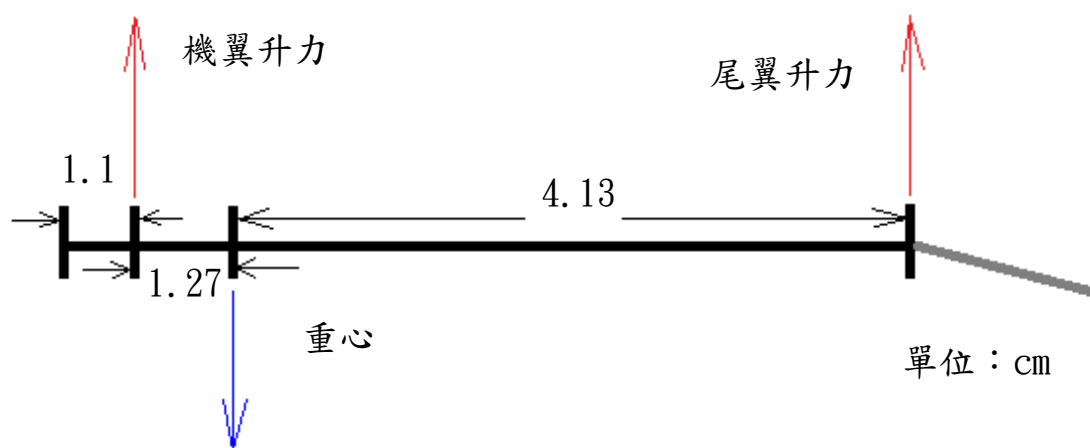


圖 58. 力矩位置示意

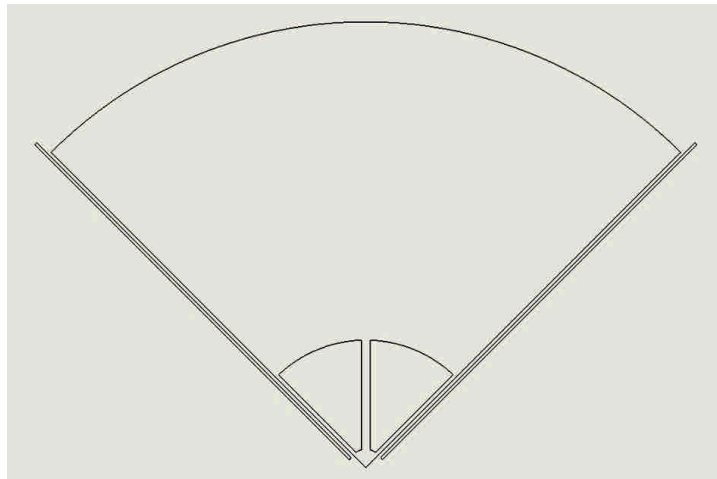


圖 59. 尾翼設計

將設計及製作完成之各部位零件組裝完成後如圖 60，全機重量為 4.28g，見圖 61。

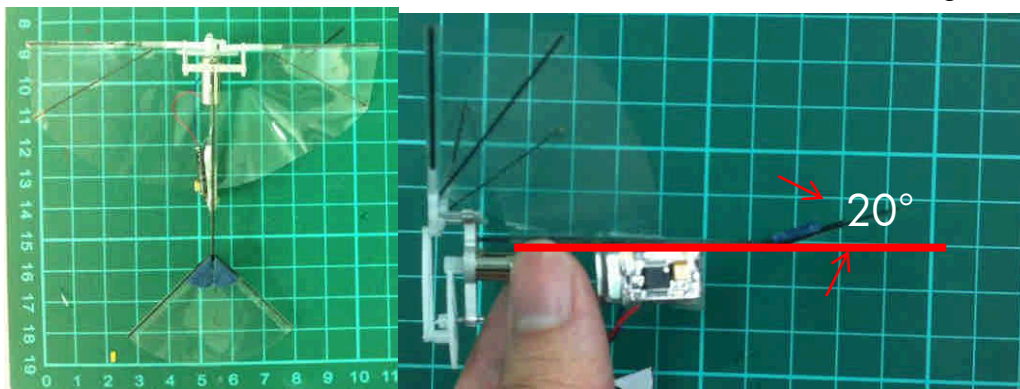


圖 60. 組裝實體



圖 61. 組裝實體重量

### 第三年：以微機電與系統單晶片技術增益翼展 10 cm 級之拍翼式微飛行器性能

#### (2) 10 cm 級翼展之拍翼 MAV 離地自由飛行

圖 62 為初次實際飛行影片截圖，本次飛行過程中因撞擊牆壁，而導致無法繼續順利飛行，僅持續飛行 6 秒。圖 63 為第二次時之飛行影片截圖，本次飛行雖成功無撞擊牆壁，卻因為中途訊號斷訊導致瞬間失速，無法順利攀升，降至地面，制空時間同樣為 6 秒。

從實際飛行測試中(圖 62 或圖 63 局部放大)可以觀察到，實際飛行時的攻角確實為  $20^\circ$ ，如圖 64，與先前設計時假設飛行攻角為  $20^\circ$  相符合，但是飛行過程中，本研究微飛行器保持飛行攻角為  $20^\circ$  的穩定姿態飛行，這說明了此時機翼產生升力的位置，與質量中心相同，如圖 65，此時升力與重力恰巧處於中性點位置(neutral point)。以尾翼作變化設定尾翼傾角為  $50^\circ$  設計實驗，如圖 66，預期飛行姿態可以達  $40^\circ$  之高攻角的低飛速，故重心需向前調，整實際飛行結果為緩緩滑行下降飛行，未達到預期的結果，但是有達到高攻角不失速的情形(delayed stall：延遲失速)，飛行時姿態會機首拉高，升力明顯不足，如圖 67，為了排除圖 67 中的現象，優先要解決的是升力要夠大，而要可以產生足夠的升力，拍翼頻率的提高，無疑是較佳的解決辦法，但是礙於拍翼頻率是藉由馬達轉速控制，馬達轉速又受限於遙控晶片組(避免馬達過熱)，故目前該問題還在克服之中。

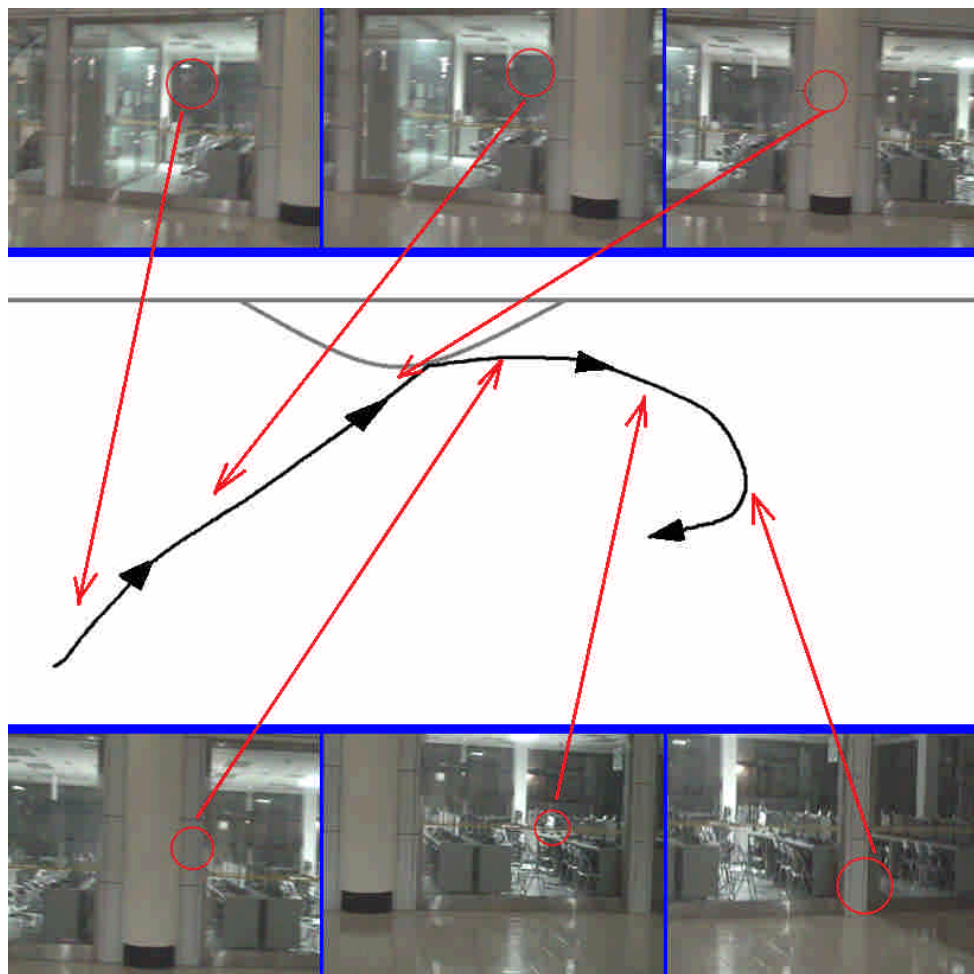


圖 62. 實際飛行路徑一



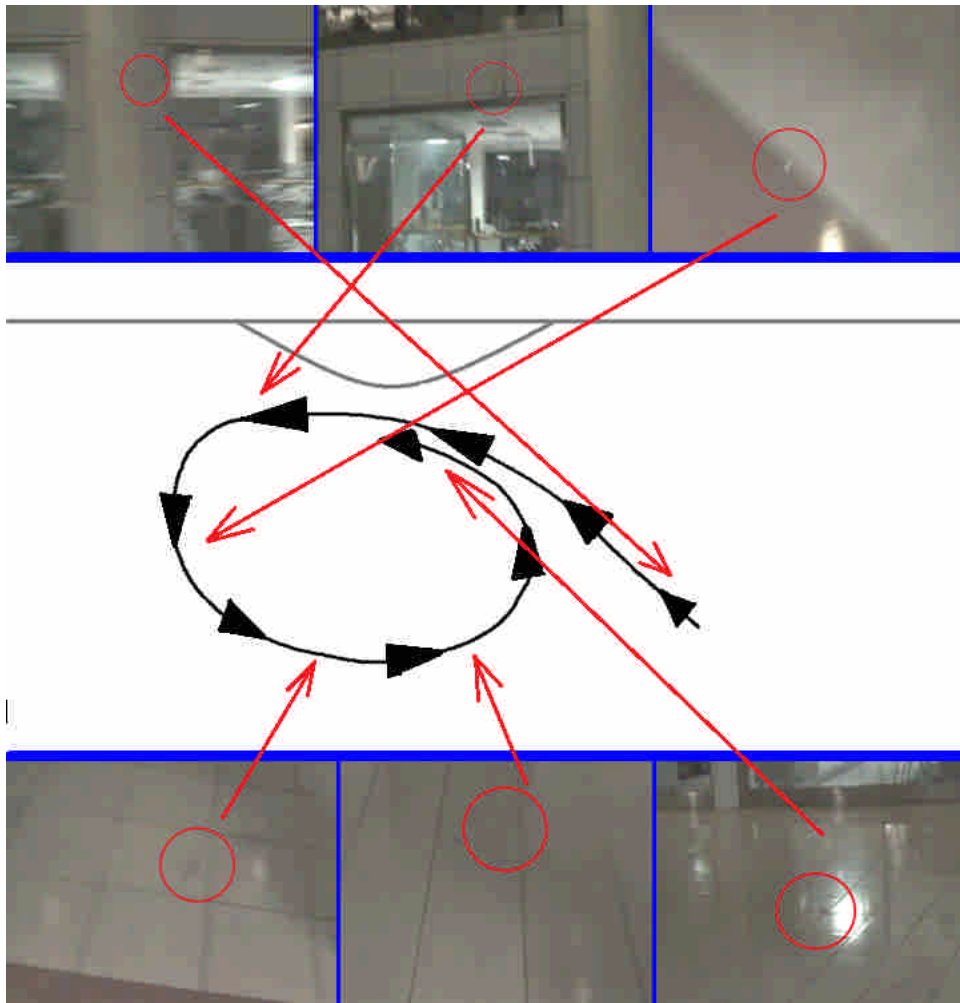


圖 63. 實際飛行路徑二

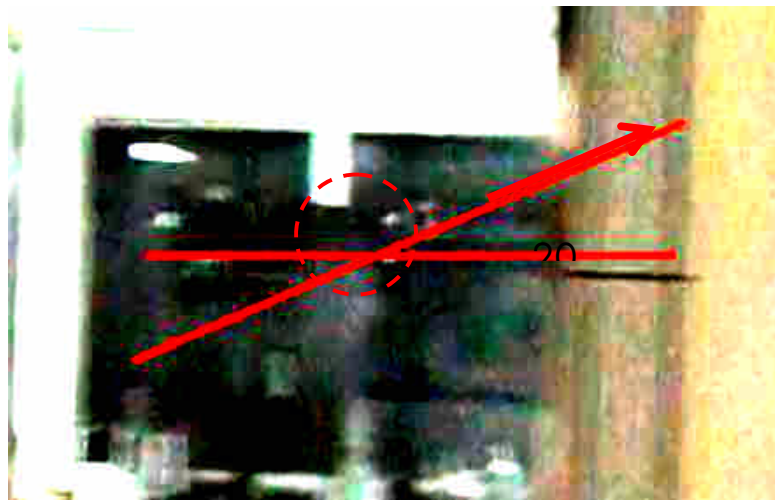


圖 64. 實際飛行路徑影像之局部放大

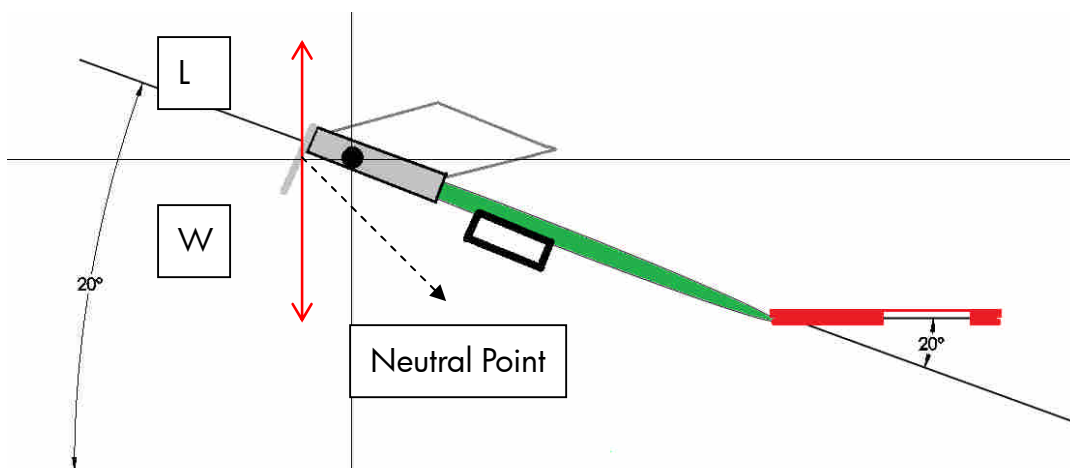


圖 65. 飛行姿態分析(攻角  $20^\circ$ )

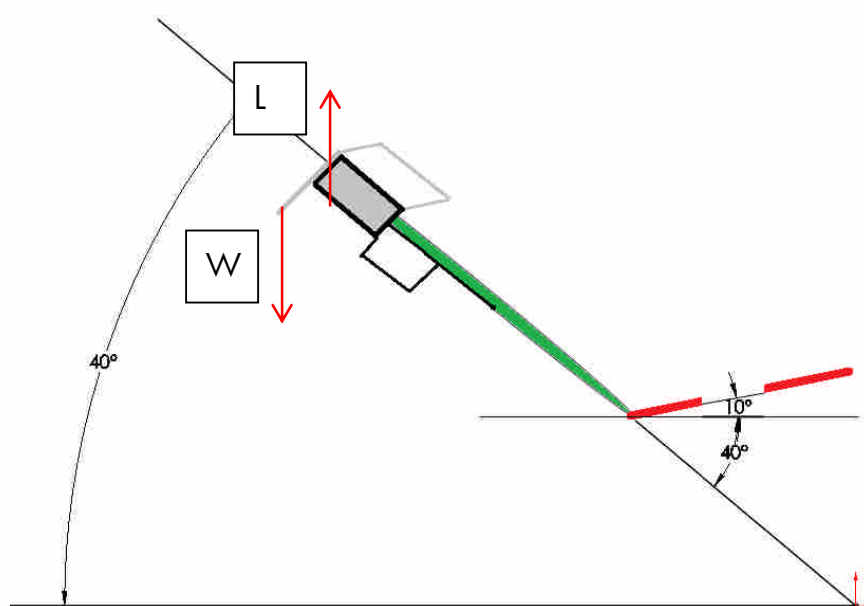


圖 66. 飛行姿態分析(攻角  $40^\circ$ )

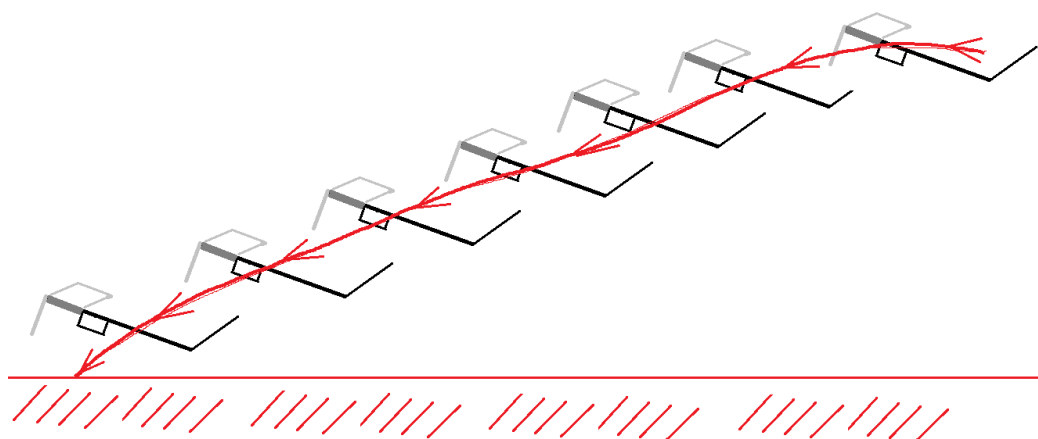


圖 67. 實際飛行路徑



表 8. 本研究質量與拍翼頻率 (理論值參考註腳<sup>36</sup>)

翼展(cm)	拍翼頻率(Hz)		質量(g)	
	實際值	理論值	實際值	理論值
10	35	44.58	4.28	2.83

表 8 為本 10 cm MAV 質量與拍翼頻率之數據，顯示距離理論計算值之重量與拍翼頻率都有些出入，實際上本研究之微飛行器重量比理論值之 2.83g，還多出了 1.47g 的質量。從表 5, 7 中可以發現，馬達是所有零組件中最重的，獲取更輕量化的馬達有其必要。本研究之微飛行器拍翼頻率為 35 Hz，比理論值 44.58 Hz 慢，所以在馬達轉速不可太低的條件下，馬達減重且不影響效能是非常重要的考量。再來對現有材料的輕量化也是有機會改良的，由於機身以採用最不佔重量的碳纖維棒，所以剩餘的零組件便是傳動機構的減重，如何取得更輕巧且耐磨耗的材料也是減重的考量。

本 10 cm MAV 研究之較佳結果為在空中以自由盤旋(soaring)的方式飛行，且藉本研究之尺度規範及相關公式的計算，未來有機會可以設計不同的翼展比例而做出對應尺寸的微飛行器，進而達到微小化開發的目的。

<sup>36</sup>參考 U. M. Norberg, *Vertebrate Flight: Mechanics, Physiology, Morphology, Ecology and Evolution*, Springer, New York, USA, 1990，一般鳥類翼展  $b$  (單位公尺)與身體質量  $M$  (單位公斤)的關係式如下：

$$b=(1.17)M^{0.39} \quad (A)$$

但是蜂鳥並不屬於一般鳥類，其關係式如下：

$$b=(2.24)M^{0.53} \quad (B)$$

一般鳥類拍翼頻率  $f$  (單位 Hz)與身體質量  $M$  (單位公斤)的關係式如下：

$$f=(3.98)M^{-0.27} \quad (C)$$

蜂鳥的關係式如下：

$$f=(1.32)M^{-0.60} \quad (D)$$

### 第三年：以微機電與系統單晶片技術增益翼展 10 cm 級之拍翼式微飛行器性能

#### (3) 太陽能薄膜電池技術結合於拍翼 MAV

本研究嘗試將薄膜式太陽能元件加入飛行器中，藉由吸收光能轉換電能之效應，使飛行器可做持續性的充電，並且以增加續航能力為目標。本實驗之太陽能薄膜元件，採用日耀科技股份有限公司之太陽能軟式薄膜電池元件，使用前需使用電焊棒將接線連結至薄膜太陽能元件的兩側（有分正負，圖案為平的地方是正，圖案為尖的地方是負），接著在正極接上二極體，而二極體主要目的是預防逆電流，保護薄膜太陽能元件，最後與飛行器之鋰電池結合，形成完整的電路架構，如圖 68(a)為太陽能薄膜與蓄電池組裝示意圖；圖 68(b)為太陽能電池之規格表圖<sup>37</sup>，依據各項數據及電量要求之考量，本實驗選用之型號為 SP4.2-37，長度與寬度為 8.5 cm 和 3.7 cm。

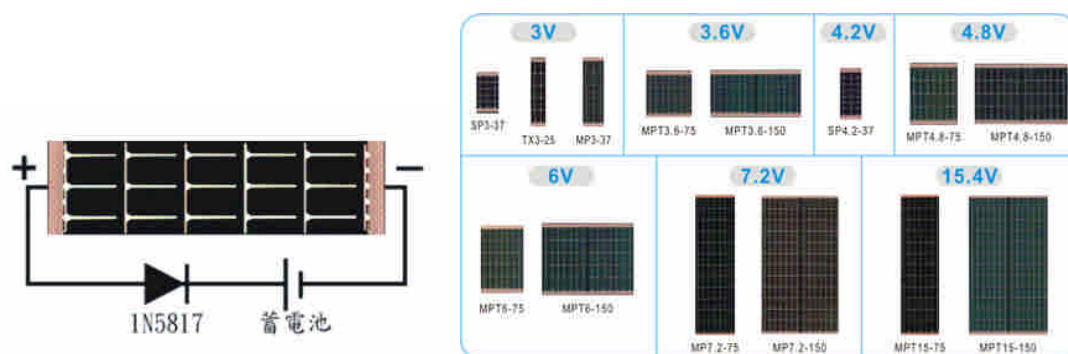


圖 68. (a)太陽能電池的示意圖；(b)太陽能軟式薄膜元件規格圖

圖 69 為薄膜式太陽能元件供電系統架構圖，薄膜式太陽能元件先吸收光線轉換成電能後，直接提供至鋰電池作為充電之用，同時鋰電池也會放電供應 MAV 飛行，因此鋰電池放電與接收薄膜式太陽能元件充電是同時進行的，在薄膜式太陽能元件線路上有裝設二極體，可防止逆電流，避免傷害薄膜式太陽能元件。組裝位置則放置於水平尾翼上，並扣除上方垂直尾翼，避免阻擋陽光照射。圖 70 為組裝完成後實際圖，(a)為雙片組裝實體圖(b)為單片組裝實體圖。

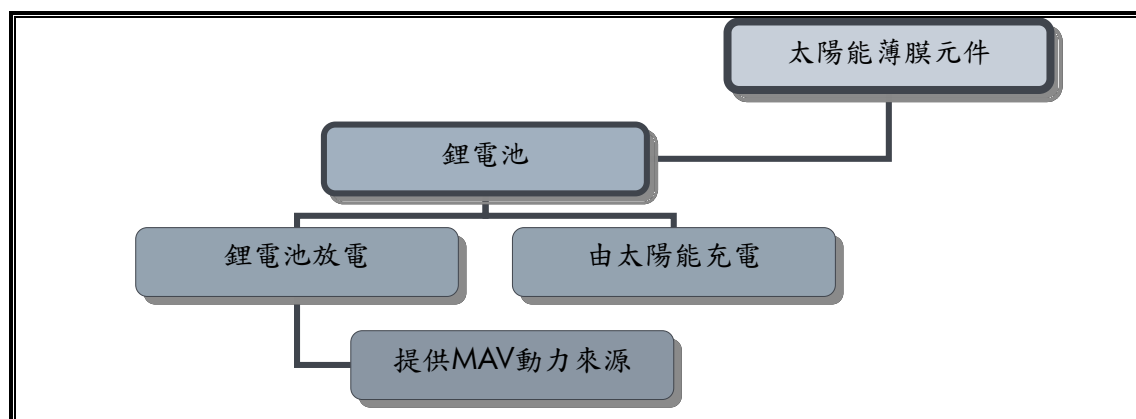


圖 69. 太陽能供電系統架構方塊圖

<sup>37</sup> Solar website, from <http://www.hemvan.com.tw/index.php?module=product&mn=2&f=content&catid=1328&tid=5948>

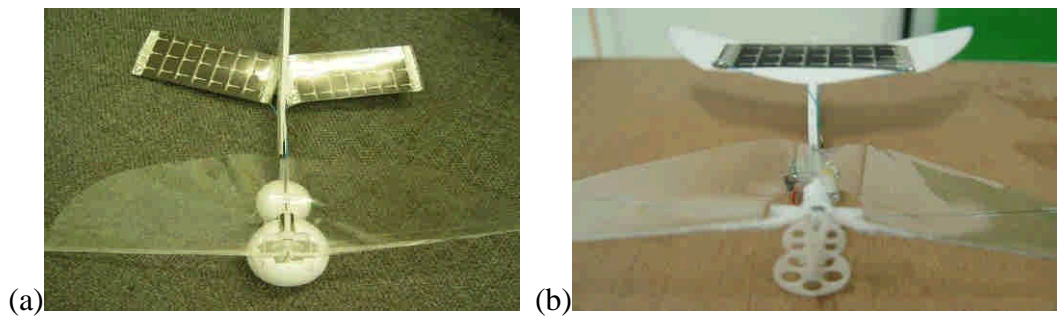


圖 70. (a)雙片組裝實體圖(b)單片組裝實體

圖 70 之兩架太陽能微拍翼機，經實際試飛，都因同時攜帶鋰電池與太陽能電池而過重(近 15 克重)，一旦重量無法減輕，便很難使微拍翼機持續飛行超過 1 分鐘，故也無法評估一邊飛行、一邊充電的果效如何。

微機電製造能夠將許多元件微小化，達到微米等級，故對於未來將微飛行器縮小化，有必要結合微機電製程，以便節省更多的重量與空間，容納更多的感測器和驅動能源。雖然目前太陽能電池在市場以及學術界都有長久的研究時間，然而單位面積效率一直是需要突破的地方，加上微飛行器的承載重量和接觸面積，比起其他地方有更多的限制在，若是在製造中就能配合微飛行器外型以及重量考量，利用薄膜式可撓特性，與飛行器翼翅膀做結合，即可增加充電效率，提高飛行時間。

### 第三年：以微機電與系統單晶片技術增益翼展 10 cm 級之拍翼式微飛行器性能

#### (4) 適用於拍翼 MAV 的無線單晶片 SoC 研製規劃

應用前述(p.27 的規劃程序)”飛行資訊整合系統”(air data integration system; ADIS)於本拍翼 MAV 的唯一問題是：現有 ADIS 之重量，至少要數百克重(大部分是印刷電路板 PCB 的重量)，遠超過本拍翼式 MAV 之全機重(未來若繼續縮小到 10 cm 翼展以下，減重問題還會更嚴重<sup>38 39</sup>)，故在本研究當初之計畫書規劃，要以系統晶片(system-on-chip)的概念進行上述 ADIS 之設計，並在同一晶片(monolithic)理念上再整合 MEMS 慣性感測器，來大幅減去 PCB 的重量並減低雜訊，最後送晶片設計製作中心(CIC)進行該系統晶片(ADIS+MEMS)實體之製作，但這個辦法在現實上仍會遭遇很大困難。

本校航太系蕭照焜教授在 MEMS 慣性感測單元(inertial measurement unit; IMU)之製作富有多年經驗，並已實際應用於本校馬德明教授研製之無人飛行載具(UAV，總機重數十公斤)，經與其詳細討論上述作法，咸認為有以下困難：

(1) ADIS+MEMS 的單晶片還是需要 chip 封裝與對應之 PCB 與偏壓供應，本 ADIS+MEMS SoC 質量幾乎不可能壓低到 1 克以下。

(2) 開發成本高昂：該 ADIS+MEMS 晶片需混成數位與類比電路，可能要耗用近 100 mm<sup>2</sup>之面積，以 CIC 委託 tsmc 代工之 0.35um DPDM 製程每 mm<sup>2</sup>約 1 萬元成本來估計，下線 CIC 費用成本超過 100 萬元！

(3) MEMS 慣性元件雖然利用 CMOS 製程量產，符合加工尺寸精確度要求，並降低單一 MEMS 晶片製作成本，但牽涉到精密慣性導航之性能需求，每一顆單晶片上的 MEMS 元件，仍需一一進行校正微調，所以 MEMS 晶片設計上要留下可調整(adjustable)的部件，且此一校正微調的成本極為昂貴，使原本 MEMS 元件技術量大價廉的優點大打折扣。

因本 SoC 的目的在於增益拍翼式 MAV 的自主飛行能力，故若將感測器與 SoC 電路改放在地面上(地面上還可以增加 MAV 之遙測台)，MAV 之上只增加微攝影晶片與原先之無線傳輸晶片，仍能進行 MAV 的視覺系統開發與姿態控制！故與本校機電系王銀添、孫崇訓教授，共同規劃較適用於拍翼 MAV 的控制系統，如圖 71：

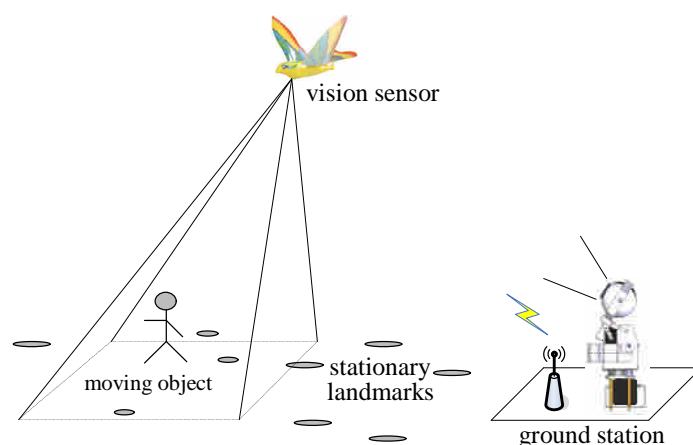


圖 71. 視覺系統與姿態控制系統圖

<sup>38</sup> R. Wood, "Fly, robot fly," **IEEE Spectrum**, pp. 25-29, March, 2008.

<sup>39</sup> W. Shyy, "Flapping and flexible wings for biological and micro air vehicles," **Progress in Aerospace Science**, 35, pp. 455-505, 1999.

圖 71 之規劃，期望能最終能達到自我定位與場景影像重建的功能。因此下一代 MAV 上將安裝微攝影模組以拍攝環境影像。藉由無線傳輸將環境影像回傳地面站。地面站將計算出控制增益值，再將控制指令回傳 MAV 以達成例如懸停之姿態控制，以利於 MAV 拍攝品質較佳之影像。而回傳至地面站的環境影像除了將進行場景環境地圖的重建，也將藉由估算 MAV 與地面靜態地標的相對關係進行自我定位，以輔助飛行路徑規劃。因此視覺系統與姿態控制效能實乃相輔相成之關係。

下一代拍翼式 MAV 在自我定位與場景重建部份規劃，將如圖 72 所示之系統流程圖：影像經由攝影機擷取之後，無線傳輸給地面台進行影像處理。使用影像特徵偵測方法偵測環境特徵。再使用特徵比對策略進行所偵測特徵與資料庫地標及物件模型的資料關聯比對。系統也將規劃狀態估測演算法與設計地圖管理策略，狀態估測演算法以預測與更新的遞迴運算方法估測 MAV、以及環境中靜態與移動的物體；而地圖管理策略則是用來處理新增特徵的初始化與不好特徵的刪除。沒有被連續偵測的特徵將被視為不好的特徵，將會從狀態向量中被移除。其次，將使用移動物體偵測演算法偵測新增特徵的特性，假如檢測結果為移動中的特徵，則將移動特徵與靜態特徵分開進行初始化處理。其中由移動特徵所構成的移動物體，必須設計其分類與辨識所需的物件模型。

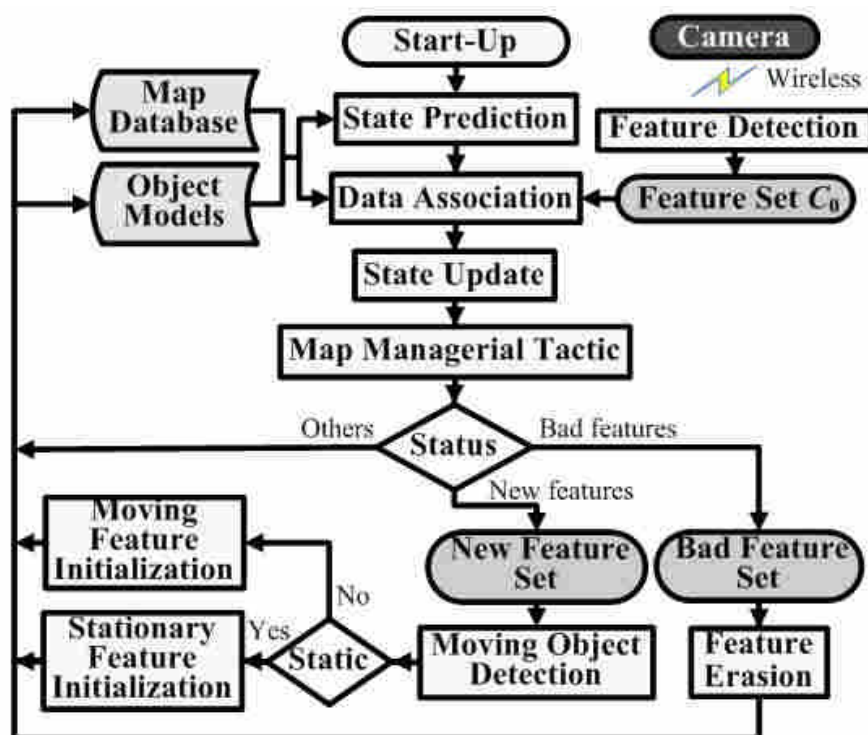


圖 72. MAV 狀態估測與自我定位系統流程圖



### 第三年：以微機電與系統單晶片技術增益翼展 10 cm 級之拍翼式微飛行器性能

#### (5) 透過科普活動推動拍翼機

在本年度內持續參與拍翼機相關科普活動，其中主要為負責辦理 2011.2.27 台灣無人飛機拍翼組競賽活動，本次競賽在國立成功大學舉辦，計有國立台南大學等 9 所大專院校 16 組隊伍參賽，透過本次競賽，也讓國內有從事微飛行器研究的學校彼此分享研究經驗，所有參賽隊伍合影如圖 73；另外，本研究團隊並於 2010.10.19-12 參加在世貿一館舉辦的台北國際機器人展，在會中，本團隊負責的是遙控飛行機器人教學 DIY，透過承辦單位的宣導，當天約有 60 組的民間人士參與 DIY 製作教學，藉此讓拍翼機的設計理念與應用得以推廣，活動情況如圖 74 所示；亦於 2010.10 與 2011.4.8 分別接受國科會工程科技通訊 E-paper 第 107-108 兩期之專訪<sup>40 41</sup>，工程科技通訊訪問內容，刊登如圖 75。精密機械研發中心(PMC)於機器人產業情報網站之訪問<sup>42</sup>。貴會科普節目「師法自然」承製單位 DVD 拍攝與報導，已於 2012 年 8 月底大愛電視台播出，部分剪影如圖 76。



圖 73、2011 全國無人載具拍翼組競賽



圖 74、2010 台北國際機器人展

<sup>40</sup>第 107 期國科會工程科技 E-paper—「愛之夢 — 金探子傳奇」：專訪淡江大學機械與機電工程學系楊龍杰教授。

<sup>41</sup>工程科技通訊，愛之夢—金探子傳奇，2010 年 10 月，108 期。

<sup>42</sup>財團法人精密機械研究發展中心，機器人世界情報網，仿生機器人創作實例—研發「金探子」的心路歷程。  
([http://www.robotworld.org.tw/data/for\\_trade1-d.php?News\\_ID=4629](http://www.robotworld.org.tw/data/for_trade1-d.php?News_ID=4629))





圖 75、2010.10 國科會工程科技通訊專訪



圖 76、科普節目「師法自然」之部分剪影: (a)實際飛行; (b)計畫主持人; (c)金探子。

### 第三年：以微機電與系統單晶片技術增益翼展 10 cm 級之拍翼式微飛行器性能

#### (6) 下階段的拍翼 MAV 應用規劃

臺灣下世代之科技研發，不只繼續呈現在既有的光電半導體與消費電子等產業界的”硬實力”，許多支援諸如生態保育、精緻教育、觀光文創等新興事業的”軟實力”，已逐漸異軍突起。這些軟實力產業，不只服務人們，也兼顧到我們的地球，一則順應人文與科技和諧共生之普世潮流，二則藉由對內的教育與娛樂，直接有利於提升臺灣民眾的”幸福”感受，在完全不同於追求 GDP 成長的發展軸線上，開創出另一種福國利民的科技願景。故本淡江大學團隊之下階段拍翼 MAV 研究，希冀開發一套兼具生態保育、精緻教育、與觀光文創應用之

「淡江蜂鳥—生態觀察尖兵」

事實上，就是開發一套具有類似蜂鳥(hummingbird)飛行能力之空中可移動式偵照系統！



「淡江蜂鳥—生態觀察尖兵」計畫，擬發展一套具有類似蜂鳥飛行能力之空中可移動式偵照系統，將偵照到之影像即時傳送回地面接受站，進行顯示與紀錄，來取代實際之人員攀爬動作，而仍可以滿足原先之生態觀察目的。由於無人墜落風險，安全性大幅提高，不僅直接造福生態研究學者與業餘玩家，還能將生態觀察活動擴大到 K-12 學子與觀光客，故稱兼具生態保育、精緻教育、與觀光文創等三大”軟實力”應用。

「淡江蜂鳥—生態觀察尖兵」之生態觀察任務界定，將參酌美國 AeroVironment 公司承包國防先進研究計畫局(DARPA)四百萬美元的蜂鳥計畫成果<sup>43</sup>，亦即：在 1.5 分鐘內，從戶外飛入室內發現確認敵人，再飛回戶外降落的紀錄當作本案技術標竿(benchmark)。

應用任務量化說明，初步擬定如下：

- (1) 啟動「淡江蜂鳥」機上攝影機，傳送影像訊號連結到地面監控站。
- (2) 「淡江蜂鳥」自地面遙控起飛，30 秒內上升到 20 公尺高空。
- (3) 依機上傳送之動態攝影圖像，1 分鐘粗略移動修正「淡江蜂鳥」位置，尋找生態觀察標的。
- (4) 「淡江蜂鳥」繼續懸停 3 分鐘，進行較細部之生態觀察紀錄。
- (5) 停止生態觀察，遙控「淡江蜂鳥」在 30 秒內回到地面安全降落。

<sup>43</sup> 參考網頁 <http://www.avinc.com/>

#### 4. 結果與討論（含結論與建議）

本計畫為期三年，以縮小拍翼式微飛行器翼展至 20 公分以下為目標，成果如下：

- 自由飛行無轉彎控制，最佳飛行時間達八分鐘；完成轉彎控制機構設計與製造，最佳飛行時間可達四分鐘以上。
- 設計合拍構型、前後對翼(同相位、相位差 180 度)機構。
- 設計大拍翼行程角及新型 PE 發泡材等構型。
- 風洞測試上，可透過實驗設備，捕獲飛行器外圍流場現象。
- 利用六軸力規可測得即時受力數據，再透過分析機制，獲得飛行器在各種飛行姿態下的升、推力。
- 在拍翼式微飛行器機構設計資料庫計建立不同拍翼行程角之影響、合拍機制設計與實體測試與多對翼對於飛行效能之影響等。
- 在可撓式 smart wing 製作方面，除利用 parylene coater 已成功沉積出本團隊所需厚度之翼膜，並包覆碳棒外，後續將針對諸如；本研究金探子類似蜂鳥、蒼蠅等傾斜八字拍翼之觀察與研究，同步整合高速拍翼影像、氣動力即時量測、可撓拍翼面 3D 座標之即時測定、以及與 CFD 之計算模擬比對。
- 以孔雀開屏仿生微結構，成功製作出液體毛細驅動微型控制鉸鏈，未來實際應用於本 MAV 之尾翼無電力驅動。
- 在 RF/IR 遙控晶片之規格訂制與訊號傳輸控制機制上，本階段研究成果已完成發射、遙控與接收等模組之發展，MEMS 慣性元件模組之校正使用也累積經驗，未來將針對減重與價昂之議題進行因應。
- 針對 10 cm 級拍翼 MAV 之縮小技術開發，本階段結合空氣動力、機構、與飛行穩定控制等領域之理論或經驗公式，以比較富有依據之方式對微飛行器尺寸進行設計，並孜孜計較各部分零組件之重量分配，整合出總機重 4.28 克重之原型機，拍翼頻率 35 Hz，初步自由試飛之滯空時間為 6 秒鐘。
- 已嘗試將薄膜式太陽能元件加入拍翼 MAV 之尾翼，經實際試飛，都因同時攜帶鋰電池與太陽能電池而過重(近 15 克重)，持續飛行能力在 1 分鐘之內。
- 為增益拍翼式 MAV 的自主飛行能力，由原先機上裝載”飛行資訊整合系統” ADIS SoC 規劃，建議改成將感測器與 SoC 電路改放在地面上(地面上還可以增加 MAV 之遙測台)，MAV 之上只增加微攝影晶片與原先之無線傳輸晶片，仍能進行 MAV 的視覺系統開發與姿態控制。
- 完成下階段的拍翼 MAV 應用規劃--「淡江蜂鳥—生態觀察尖兵」。
- 產學合作上，完成國科會五十學之旅等四項活動，總人次約 300 人，參與人員背景包含各級學校學生與教師，對於爾後推展國內拍翼機發展極有幫助。
- 金探子已經與飛行達人公司合作，透過技術移轉，研究成果已經產品化，並對外以小批量模式販售。

- 支援東森財經新聞台拍攝《科學成就之旅》科普節目：「現代魯班」(已於 2009 年 10 月 11 日播出; <http://blog.nownews.com/scientist/textlist.php>) [31]。
- 協辦 2009-2012 年之全國無人飛機設計比賽—拍翅翼組之賽事(地點分別在淡江、成大與勤益科大)，每年均有 15-20 隊參賽。
- 2009 年 12 月 12 日於中華科技大學，支援航太學門成果發表之現場實體成果飛行展示。
- 參加 2010 年台北國際機器人展，負責 60 組的民間人士參與 DIY 製作教學推廣。
- 接受工程科技 E-paper 第 107-108 兩期之專訪。
- 接受精密機械研發中心(PMC)於機器人產業情報網站之訪問。
- 支援貴會【師法自然】專輯承辦單位之專訪與 DVD 拍攝(已於 2012 年 8 月 30 日大愛電視台播出) [30, 32-33]。

至於本計畫在三年期之學術研究與產學成果，累計如下：

- SCI 國際期刊論文 9 篇 [1-9]。
- 國際會議論文 13 篇 [10-22] (一篇最佳論文[10])。
- 國內會議論文 6 篇 [23-28]。
- 專書專章 1 篇 [29]。
- 美國發明專利 1 件 [34]。
- 臺灣發明專利 2 件 [35-36]。
- 指導 15 位碩士生學位論文畢業 [37-51]。

## 誌謝

- 感謝淡江大學前學術副校長陳幹男教授在 PE 發泡材上之協助；
- 感謝國立體育大學教練研究所湯文慈所長在立體運動即時座標截取技術之提供；
- 感謝淡江大學航太系蕭富元教授在遙控訊號傳輸技術之協助；
- 感謝淡江大學航太系蕭照焜教授在 MEMS 慣性感測模組之提供意見；
- 感謝淡江大學機電系康尚文教授提供高速攝影機之使用。

## 5. 參考文獻

(含執行本計畫相關之著作、專利、技術報告、或學生畢業論文)

- [1] (著作：期刊論文)Lung-Jieh Yang, Cheng-Kuei Hsu, Hsieh-Cheng Han, and Jr-Ming Miao, 2009, "A light flapping micro-aerial-vehicle using electrical discharge wire cutting technique," *Journal of Aircraft*, v. 46, n. 6, pp. 1866-1874 (IF=0.552; ENGINEERING, AEROSPACE: 12/28) **【2 times cited by Scopus】**
- [2] (著作：期刊論文)Yung-Chiang Chung, Guo-Yuan Hess, Fu-Wen Yeh, Hsieh-Cheng Han, Chien-Yuan Chen, Ching-Jiun Lee, Horn-Jiunn Sheen, and Lung-Jieh Yang, 2010, "Fabrication and testing of surface ratchets primed with hydrophobic parylene and hexamethyldisilazane for transporting droplets," *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, v. 9 (1), 013035 (IF=1.194; ENGINEERING, ELECTRICAL & ELECTRONIC: 104/247).
- [3] (著作：期刊論文)Lung-Jieh Yang, 2010, "On gas-permeation in PDMS," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, v. 20, n. 11, 115033 (IF=2.281; INSTRUMENTS & INSTRUMENTATION: 8/61) **【2 times cited by Scopus】**
- [4] (著作：期刊論文)Lung-Jieh Yang and Tzu-Yuan Lin, 2011, "A PDMS-based thermo-pneumatic micropump with parylene inner walls," *Microelectronic Engineering*, v. 88, n. 8, pp. 1894-1897. (IF=1.575, ENGINEERING, ELECTRICAL & ELECTRONIC: 66/247)
- [5] (著作：期刊論文)Lung-Jieh Yang, A-Fu Kuo, and Cheng-Kuei Hsu, 2012, "Wing stiffness on light flapping micro aerial vehicles," *Journal of Aircraft*, v. 49, n. 2, pp. 423-431 (IF=0.552; ENGINEERING, AEROSPACE: 12/28).
- [6] (著作：期刊論文)Lung-Jieh Yang, Chung-Yu Kao, and Chin-Kwang Huang, 2012, "Development of flapping ornithopters by precision injection molding," *Applied Mechanics and Materials*, v. 163, pp. 125-132 (EI).
- [7] (著作：期刊論文)Lung-Jieh Yang, 2012, "The micro-air-vehicle *Golden Snitch* and its figure-of-8 flapping," *Journal of Applied Science and Engineering*, v. 15, n. 3, pp. 197-212 (EI).
- [8] (著作：期刊論文)F.Y. Hsiao, H.K. Hsu, C.L. Chen, L.J. Yang, 2012, "Using stereo vision to acquire the flight information of flapping-wing MAVs", *Journal of Applied Science and Engineering*, v. 15, n. 3, pp. 213-226 (EI).
- [9] (著作：期刊論文)Lung-Jieh Yang, Tsung-Sheng Sheu, Bo-Hong Chen, and Chia-Chan Lee, 2012, "Chaotic vessels fabricated by fractal gelatin," *Micro & Nano Letters*, v. 7(8), pp. 705-708 (IF=0.836).
- [10] (著作：會議論文) Yi-Shao Chen , Pei-Chun Weng, Po-Hung Chen, and Lung-Jieh Yang, 4-5 Dec, 2009, "Flexural stiffness effect on lift force of flapping micro aerial vehicles," Proc. of 2009 International Conference on Mechatronic System of Integration and Application (ISBN 978-986-02-1190-0), Tainan, Taiwan, pp. 132-137. **(Best Student Paper Award-Silver medal)**
- [11] (著作：會議論文)Yang, L.-J., Jan. 20-23, 2010, "Gas permeation in PDMS monitored by on-site pressure sensors," The 5th IEEE International Conference on Nano/Micro

*Engineered and Molecular Systems, IEEE NEMS 2010*, Xiamen, China, pp. 348-351. **【1 time cited by Scopus】**

- [12] (著作：會議論文)K.-F. Chang, Y.-C. Tsai, W. -P. Shih, and L.-J. Yang, Jan. 24-28, 2010, “An electro-active nano-valve array for reusable drug delivery system,” Proceeding of the 23rd IEEE MEMS (**MEMS’10**) , Hongkong, pp. 1039-1042.
- [13] (著作：會議論文)L.-J. Yang, J.-M. Maio, A.-F. Kuo, and C.-K. Hsu, Jun. 28-Jul.1, 2010, “Effect of flexural stiffness on the aerodynamic forces of flapping MAVs,” The 28th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Chicago (art. no. AIAA 2010-5077).
- [14] (著作：會議論文)L.-J. Yang and T.-Y. Lin, Sep. 19-22, 2010, “A PDMS-based thermopneumatic micropump with parylene inner walls,” MNE 2010, Genoa (Italy).
- [15] (著作：會議論文)Lung-Jieh Yang, Chia-Chan Lee, Po-Hung Chen, Chih-Wen Hsu, Feb. 20-23, 2011, “Confined fractal patterns in gelatin,” The 6th *IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, IEEE NEMS 2011*, Kaohsiung, Taiwan.
- [16] (著作：會議論文)A-Fu Kao, Lung-Jieh Yang, Fu-Wen Yeh, Feb. 20-23, 2011, “Fractal grooves applied to passive micro-mixers,” The 6th *IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, IEEE NEMS 2011*, Kaohsiung, Taiwan.
- [17] (著作：會議論文)L.J. Yang, I.C. Huang, Y.S. Chen, W.T. Tang, and A.B. Wang, “A parylene-LED wingbeating indicator for visual remote sensing,” June 5-9, Technical Digest of the 16th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers '11), Beijing, China, pp. 422-425, 2011.
- [18] (著作：會議論文)L.J. Yang, C.W. Hsu, and Y.C. Ou, “The minimum time estimation for initiating tumor-cell attachment,” June 5-9, Technical Digest of the 16th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers '11), Beijing, China, pp. 2386-2389, 2011.
- [19] (著作：會議論文)L.-J. Yang et al., Nov. 6-9, 2011, “An ultra-small Wankel engine by MEMS process,” The 10<sup>th</sup> International Heat Pipe Symposium, Tamsui, Taiwan, pp.272-276.
- [20] (著作：會議論文)L.-J. Yang and T.-H. Wang, Mar. 5-8, 2012, “Design of a small Wankel engine,” The 7th *IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE NEMS 2012)*, Kyoto, Japan, pp. 317-320.
- [21] (著作：會議論文)L.-J. Yang and B.-H. Chen, Mar. 5-8, 2012, “Blood vessels by fractal gelatin,” The 7th *IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE NEMS 2012)*, Kyoto, Japan, pp. 242-245.
- [22] (著作：會議論文)L.-J. Yang, C.-Y. Kao, and C.-K. Huang, Mar. 23-25, 2012, “Development of flapping ornithopters by precision injection molding,” Proc. of the 9<sup>th</sup> International Conference on History of Mechanical Technology and Mechanical Design, Tainan, Taiwan, pp. 123-130.
- [23] (著作：會議論文)廖俊瑋、陳柏宏、韓謝忱、楊龍杰、馮朝剛，”翼展 10 公分拍翼式微飛行器之研製”，2009 中華民國航空太空學會/中華民國航空學會聯合學術研討會，台北，民國 98 年 12 月 12 日。



- [24] (著作：會議論文)高阿福、許政慶、楊龍杰，”微飛行器拍翼行程角對其氣動力之影響”，第 18 屆國防科技學術研討會，桃園，民國 98 年 11 月。
- [25] (著作：會議論文)高崇瑜、翁培鈞、楊龍杰、馮朝剛，”應用精密模造技術於微飛行器套件組之設計與製造”，中國機械工程學會第 26 屆全國學術研討會，台南，民國 98 年 11 月 21 日。
- [26] (著作：會議論文)苗志銘、孫維新、戴昌賢、洪健君、楊龍杰，”類蜻蜓翼之氣動力特性模擬與分析”，2009 中華民國航空太空學會/中華民用航空學會聯合學術研討會，台北，民國 98 年 12 月 12 日。
- [27] (著作：會議論文)楊龍杰，陳泓嘉，陳羿韶，高阿福，馮朝剛，”微飛行器風洞測試訊號截取半自動化之研究”，第七屆海峽兩岸航空太空學術研討會，台北淡水，2010 年 11 月。
- [28] (著作：會議論文)陳泓嘉，陳羿韶，高阿福，馮朝剛，楊龍杰，”微飛行器風洞測試訊號截取半自動化之研究”，2010 中華民國航太學會學術研討會，桃園，中華民國 2010 年 12 月。
- [29] (著作：專書專章)Lung-Jieh Yang, “Flapping Wings with Micro Sensors and Flexible Framework to Modify the Aerodynamic Forces of a Micro Aerial Vehicle,” Chapter 33 of *Aerial Vehicles*, I-Tech Book Corp., 2009.
- [30] (著作：科普 DVD 節目)「發現」第七十集，”動物行為仿生大觀” DVD，大愛電視台，2010 年春。
- [31] (著作：科普 DVD 節目)國科會五十科學成就第六集，”現代魯班” DVD，東森電視台，2010 年秋。
- [32] (著作：科普 DVD 節目)「來點兒科學」第 84 集，”鳥拍翅飛行” DVD 科普短片，東玉環境科技，2011 年春。
- [33] (著作：科普 DVD 節目)「師法自然」，”仿生科技” DVD，亮相館影像文化，2012 年夏。
- [34] (專利：美國) Biomimetic Micro-Aerial-Vehicle with Figure-8 Flapping Trajectory, US 8,033,499 B2, 2011.
- [35] (專利：臺灣) 拍翼軌跡呈 8 字型之仿生微型飛行器，I 339634，2011.
- [36] (專利：臺灣) 具有交聯的生物高分子微圖案的生醫裝置及其製備方法，I363800，2012。
- [37] (學生畢業論文)陳泓嘉，微飛行器風洞測試訊號擷取半自動化之研究，淡江大學機械與機電工程學系碩士論文，99 年 6 月。
- [38] (學生畢業論文)辛宗訓，壓感塗料應用於高分子彈性翼膜之研究，淡江大學機械與機電工程學系碩士論文，99 年 6 月。
- [39] (學生畢業論文)方廷旗，無閥式微幫浦之研製，淡江大學機械與機電工程學系碩士論文，99 年 6 月。
- [40] (學生畢業論文)林宗煌，多通道生醫電阻抗分析系統研製，淡江大學機械與機電工程學系碩士論文，99 年 6 月。
- [41] (學生畢業論文)李佳展，碎形明膠微圖案新穎製程之研究，淡江大學機械與機電工程學系碩士論文，99 年 6 月。

- [42] (學生畢業論文)葉富文，碎形微圖案應用於被動式微混合器之研製，淡江大學機械與機電工程學系碩士論文，99 年 6 月。
- [43] (學生畢業論文)陳羿韶，拍翼式飛行器之微小化改良，淡江大學機械與機電工程學系碩士論文，100 年 6 月。
- [44] (學生畢業論文)王贊翔，微機電汪克爾引擎之研製，淡江大學機械與機電工程學系碩士論文，100 年 6 月。
- [45] (學生畢業論文)馮龍田，基於對稱性破壞之液體驅動器研製，淡江大學機械與機電工程學系碩士論文，100 年 6 月。
- [46] (學生畢業論文)陳柏宏，明膠基底人工血管之初探，淡江大學機械與機電工程學系碩士論文，100 年 6 月。
- [47] (學生畢業論文)徐智文，防止肝癌細胞貼附之力學探討，淡江大學機械與機電工程學系碩士論文，100 年 6 月。
- [48] (學生畢業論文)江逸偉，大行程拍翼減速機構，淡江大學機械與機電工程學系碩士論文，101 年 6 月。
- [49] (學生畢業論文)葉星志，可撓拍翼之三維軌跡與二維流場探索，淡江大學機械與機電工程學系碩士論文，101 年 6 月。
- [50] (學生畢業論文)詹東霖，仿生尾舵與微轉子引擎之製作，淡江大學機械與機電工程學系碩士論文，101 年 6 月。
- [51] (學生畢業論文)呂傑文，微流道表粗對於細胞貼附之影響，淡江大學機械與機電工程學系碩士論文，101 年 6 月。

## 國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

### 1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

☒ 達成目標

☐ 未達成目標（請說明，以 100 字為限）

☐ 實驗失敗

☐ 因故實驗中斷

☐ 其他原因

說明：

### 2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文：☒ 已發表 ☐ 未發表之文稿 ☐ 撰寫中 ☐ 無

專利：☒ 已獲得 ☐ 申請中 ☐ 無

技轉：☐ 已技轉 ☒ 洽談中 ☐ 無

其他：（以 100 字為限）

### 3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

- 學術成就：發現人工微拍翼機之傾斜 8 字拍翼流固耦合現象，分別發表在 Journal of Aircraft, Applied Mechanics and Materials, Journal of Applied Science and Engineering 等國際期刊，與 AIAA 年會、Transducers-2011、ICTAM-2012 等國際會議。
- 技術創新：以妥善調整剛性之可撓翼面結構，配合單自由度上下拍動之簡易四連桿機構，結合為傾斜 8 字拍翼，並獲准 2011 年美國專利 US 8,033,499 B2。
- 社會影響：協助拍攝多次科普節目 DVD，於大愛與東森電視台播出，並舉辦多次暑期科普營隊，邀集學生與家長參加，讓社會大眾了解仿生拍翼與微飛行器科技。

# 國科會補助專題研究計畫項下出席國際學術會議心得報告

2012 年 3 月 12 日

計畫編號	NSC 98-2221-E-032-025-MY3		
計畫名稱	20 公分翼展以下之拍翼式微飛行器的縮小化與減重研究 (3/3)		
出國人員 姓名	楊龍杰	服務機構 及職稱	淡江大學機電系 教授
會議時間	2012 年 3 月 4 日至 2012 年 3 月 8 日	會議地點	日本·京都
會議名稱	(中文) 第七屆國際奈微米工程與分子系統會議 (英文) The 7 <sup>th</sup> International Conference of Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS 2012)		
發表論文 題目	(中文) 1. 碎形明膠製作人工微管 (W2B3) 2. 小型萬扣引擎之設計 (W2C1) 3. 擔任技術議程委員與 W5B 分場主持人 (英文) 1. Blood Vessels by Fractal Gelatin (W2B3) 2. Design of a Small Wankel Engine (W2C1) 3. TPC member and Session Chair of W5B		

## 一、 參加會議經過

IEEE NEMS 國際會議，由著名微機電學者何志明(C.-M. Ho)教授發起於 2006 年中國珠海(第一屆會議)，其後分別於曼谷(2007)、三亞(2008)、深圳(2009)、廈門(2010)、與高雄(2011)等地續辦。雖大部分集中於亞太地區的華人國家，但去年在高雄舉行之第六屆會議，英文論文與口頭報告之水準均已大幅提升，今年更移到日本京都(2012)舉辦，在 311 日本核震災屆滿週年前夕，仍吸引全世界 21 國學者投稿 337 篇摘要，以及最後超過 276 位教授與學生註冊報名與會。

報告人自 2009 年以來，已多次擔任本會議之技術議程委員(亞太區 TPC member)，擔任大會論文摘要之審查，今年同時也發表 2 篇口頭論文與擔任分場主持人。交通行程如下：

- 3/4 上午，搭乘長榮 BR-2132 班機由台北到關西國際機場，再搭 JR 關西特急(遙)列車抵京都。
- 3/5 下午，於京都大學舉行接待酒會(welcome reception)與 VIP 晚宴。圖 1 為大會主席京都大學機械系 Osamu Tabata 教授，於 VIP 晚宴致歡迎辭的情形；Tabata 教授曾主辦過 IEEE MEMS 2003 國際盛會，以 TMAH 等之研究享譽世界。



圖 1、大會主席於 VIP 晚宴致辭。

- 3/6 上午於京都大學百年紀念館 1F 舉行大會開幕式(open addressing)與三場邀請演講(plenary talks)。由於此次大會規定現場不能攝影錄音，故報告人只在會場外留影(如圖 2)；圖 3 為會議地點所在京都大學正門之一景。



圖 2、報告人在會場外留影。



圖 3、會議地點所在京都大學正門。

開幕式後之三場邀請演講分別為：



- 瑞士 EPFL 理工學院 N. F. de Rooij 教授，MEMS Based Tools for Nanoscience and Atomic Clocks
- 美國加州理工學院 P. W. K. Rothemund 教授，Beyond Watson and Crick: Programming DNA Self-Assembly for Nanofabrication
- 香港中文大學 C. P. Wong 教授，Recent Advances on Nano-Materials for Advanced Packaging Applications

報告人對於第二篇演講所提及之 DNA 磁磚(tiling)印象較為深刻，Rothemund 利用 DNA 鹼基 A-T 與 G-C 互補的特性，先訂製固定之分子板塊作為 tile (尺寸只有 6 奈米)，再於 tile 之四角安裝特定之鹼基引子，便可從萬萬個分子 tile，以摺紙(origami)的方式，自我組裝成千千百個微米大小之笑臉(gomi)，至於電性不佳的問題，可利用鑲入奈米金屬粒子來解決，綜言之，本文提供一種新的奈米製造的方法。

- 3/6 下午起於京都大學百年紀念館 2F 舉行壁報論文(poster papers)與口頭論文(oral papers)之各分場。



圖 4、大會分場報告場地。

- 3/7 上午口頭論文場次。

報告人接連在 B 分場與 C 分場進行 2 篇文章之宣讀：

- Blood Vessels by Fractal Gelatin (W2B3)碎形明膠流道
- Design of a Small Wankel Engine (W2C1)萬扣引擎

碎形明膠部分，觀眾有 2 個提問：(1)如何讓圖案重覆性提高？報告人事實上在去年 NEMS 會議上已經報告過，限制明膠塗佈的面積越小，碎形圖案相似性越高。(2)為何不灌注全血測試？原因在於本碎形明膠仍有毒性，冒然使用全血，實際的意義有限，且全血屬非牛頓流體，較缺乏壓差與流量之正確關係式。

萬扣引擎部分，觀眾也有 2 個提問：(1)引擎主體用 PDMS 製作，但 PDMS 會漏氣，如何因應？報告人簡答以聚對二甲苯(parylene)鍍膜製程改善。(2)未來應用何在？報告人簡答在於廢熱回收(energy harvest)，至於旋轉動能運用在何處，則見仁見智；未來或可與微飛行器(MAV)之拍翼驅動相關。

- 3/7 下午壁報論文與主持 W5B 口頭論文場次。

報告人擔任本分場之主持人(Session Chair of W5B: Microfluidic Devices)，共六篇文章，主持人職責為控制報告時間以及導引觀眾發問，必要時自行發問，讓整個分場熱鬧起來。

- 3/7 大會晚宴(banquet)。



1. 日本傳統擊鼓表演(內容略)。
2. 頒發 3 篇最佳論文：
  - 大會最佳論文：(臺灣清華大學) J. H. Wen et al., Micro Device Array Design and Fabrication in Monolithic MEMS SoC
  - C.-M. Ho 最佳論文：(臺灣海洋大學) S. H. Huang et al., Light-Addressable Electrochemical Micropatterning of Cell-Encapsulated Alginate Hydrogels for Cell-Based Microarray
  - 最佳學生論文：(美國加州理工學院) P. Satsanarukkit et al., A Free-Standing and Flexible Polyethylene PCR Device
3. 宣佈下次會議地點：中國蘇州。
  - 3/8 上午搭 JR 關西特急(遙)列車抵關西國際機場，乘坐長榮 BR-2131 班機回台北。

## 二、 與會心得

- 本次會議以臺灣 89 篇論文最多，參加與會人數也最多，3 篇最佳論文有 2 篇被臺灣代表奪下。地主日本參加人數反而少於臺灣與中國，連與會的美國代表都覺得詫異，顯見 311 核震災對日本的確造成極嚴重的傷害，尤其位於仙台之東北大學，以往都會派出大批研究生與會，此次只有一篇論文代表。
- 本次會議由以往飯店移回大學舉辦，優點是費用較低(本會議之註冊費是所有微機電國際會議中最低者)，學術氣氛較濃郁，也就近吸引地主大學師生參加；缺點是場地較小(300 人是上限)，以壁報論文為例，參酌圖 4，便就近安排張貼在較大的兩個分場會議廳周圍。另外參加人員要往返大學與旅館，舉辦國要考量大會當地之交通便不便利。
- 本次會議已同時決定未來幾年之舉辦國，2013 年在中國蘇州，2014 年在韓國濟州，2015 年在夏威夷，另外新加坡也有意爭取 2016 年會議，本國際會議每屆均有超過 250 人之基本與會人數，且安排轉投 SCI 期刊 *Micro & Nano Letters* (impact factor 約 0.8-1.0)，算是一個已邁入成熟穩定階段的國際會議。

## 三、 建議

- 臺灣在微奈米科技之學術水準，在全世界僅次於美日，近年來已逐漸接辦相關之大型國際會議，如今年 2012 年底之 IEEE Sensor，與明年 2013 的 IEEE MEMS 與 Micromachine Summit。固然 2011 年臺灣(成大)已舉辦過本國際會議，也可考慮由其他大學繼續爭取主辦 2016 年之後的屆次(本會議國際執委會幹事長為香港城市大學李文龍教授 Wen J. Li，有意主辦會議的大學，要及早向其表明意願與計畫)。
- 報告人在會期中與雲科大機械系郭佳儷教授交換意見(其早期曾參與我國第一個微機電產學計畫—高深寬比紡口 LIGA spinneret 開發)，我們共同發覺，國內同行學者在國內不常碰面，反而到國外才有機會長談國內科技發展之現況與優劣。其建議國內微奈米協會應委託部分學者向國科會申請計畫經費，定期辦理國內之微奈米科技產學論壇，藉由國外論壇之意見交流，加速最新科技訊息之流通傳播速度，才不至於被其他國家迎頭趕上。

## 四、 攜回資料名稱及內容

- 大會論文集光碟。
- 大會論文摘要集。
- 參加人員名冊。

-----Original Message-----

From: IEEE-NEMS2012 [mailto:nems2012\_pcc@nms.me.kyoto-u.ac.jp]  
Sent: Sunday, October 30, 2011 9:46 PM  
To: Lung-Jieh Yang  
Cc: Tsan-Hsiang Wang; IEEE-NEMS2012  
Subject: [IEEE-NEMS2012] Your Paper #8

Dear Lung-Jieh Yang, Tsan-Hsiang Wang:

On behalf of the IEEE-NEMS2012 Program Committee, we are delighted to inform you that the following submission has been accepted as ORAL PRESENTATION to appear at the conference:

PaperID #8

Design of a Small Wankel Engine

Lung-Jieh Yang, Tsan-Hsiang Wang

Congratulations!!

The online registration form is available on the conference Website  
(<http://www.ieee-nems.org/2012/registration/>).

Please note that the FINAL versions of Full Paper and the copyright form will be due by November 30th, 2011.

Please also note that in order for us to publish your paper, it must satisfy ALL of the following conditions:

- 1) At least one author on the paper must register for the conference as stipulated by the conditions provided in the conference registration form;
- 2) The paper MUST be presented at the conference by one author(in English);
- 3) Your final version of the FULL paper must follow IEEE publication format STRICTLY and must be IEEE Xplore compatible. You must also submit a copyright form for your paper (to be uploaded to the website by November 30th 2011 ).

Please understand that these conditions are set to safeguard the quality of publications from the IEEE-NEMS conference series and also allow the published papers have potentially impact to the engineering and scientific communities world-wide. If you have any additional questions, please feel free to get in touch.

Congratulations again, we look forward to seeing you at IEEE-NEMS2012.

Best Regards,

Qing-An Huang, Technical Program Co-Chair Toshiyuki Tsuchiya, Technical Program Co-Chair

-----  
This is an automatically generated message from ConfMaster for IEEE-NEMS 2012 Organizers.

-----Original Message-----

From: IEEE-NEMS2012 [mailto:nems2012\_pcc@nms.me.kyoto-u.ac.jp]  
Sent: Sunday, October 30, 2011 9:47 PM  
To: Lung-Jieh Yang  
Cc: Po-Hong Chen; IEEE-NEMS2012  
Subject: [IEEE-NEMS2012] Your Paper #10

Dear Lung-Jieh Yang, Po-Hong Chen:

On behalf of the IEEE-NEMS2012 Program Committee, we are delighted to inform you that the following submission has been accepted as ORAL PRESENTATION to appear at the conference:

PaperID #10

Blood Vessels by Fractal Gelatin

Lung-Jieh Yang, Po-Hong Chen

Congratulations!!

The online registration form is available on the conference Website  
(<http://www.ieee-nems.org/2012/registration/>).

Please note that the FINAL versions of Full Paper and the copyright form will be due by November 30th, 2011.

Please also note that in order for us to publish your paper, it must satisfy ALL of the following conditions:

- 1) At least one author on the paper must register for the conference as stipulated by the conditions provided in the conference registration form;
- 2) The paper MUST be presented at the conference by one author(in English);
- 3) Your final version of the FULL paper must follow IEEE publication format STRICTLY and must be IEEE Xplore compatible. You must also submit a copyright form for your paper (to be uploaded to the website by November 30th 2011 ).

Please understand that these conditions are set to safeguard the quality of publications from the IEEE-NEMS conference series and also allow the published papers have potentially impact to the engineering and scientific communities world-wide. If you have any additional questions, please feel free to get in touch.

Congratulations again, we look forward to seeing you at IEEE-NEMS2012.

Best Regards,

Qing-An Huang, Technical Program Co-Chair Toshiyuki Tsuchiya, Technical Program Co-Chair

-----  
This is an automatically generated message from ConfMaster for IEEE-NEMS 2012 Organizers.

-----Original Message-----

From: TSUCHIYA Toshiyuki [mailto:tutti@me.kyoto-u.ac.jp]  
Sent: Wednesday, February 22, 2012 10:22 AM  
To: ljyang@mail.tku.edu.tw  
Subject: [NEMS2012@Kyoto]Session Chair Information

Dear Prof. Lung-Jieh Yang,

This is the information for session chairs of NEMS 2012

Thank you for accepting a session chair.  
Here I am sending short information for chairs.  
Your session is:

W5B: Microfluidic Devices  
Wednesday, March 7, 16:30-18:00

Please check it again and if you have any problems, tell me.

Papers in your session can be downloaded from  
[http://www.nms.me.kyoto-u.ac.jp/nems/W5B\\_papers.zip](http://www.nms.me.kyoto-u.ac.jp/nems/W5B_papers.zip)  
You will be asked to provide username and password, which are  
Username: nems  
Password: nems

And an attached file is guidelines for session chair, We would appreciate if you check the guideline before the conference.

I am looking forward to seeing you in Kyoto soon!

Best regards,

Toshiyuki TSUCHIYA  
Program Co-chair, IEEE NEMS 2012

\*\*\*\*\*

Toshiyuki TSUCHIYA, Dr. Eng.  
Associate Professor  
Department of Micro Engineering, Kyoto University  
Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501 JAPAN  
TEL : +81-75-753-4753 (direct)  
FAX : +81-75-753-5250  
Email : tutti@me.kyoto-u.ac.jp

# Blood Vessels by Fractal Gelatin

Lung-Jieh Yang\*, Bo-Hong Chen

\*Department of Mechanical and Electromechanical Engineering, Tamkang University, TAIWAN  
Ljyang@mail.tku.edu.tw

**Abstract**—In this study the authors developed a novel gelatin patterning technique applied to making blood vessel with fractal dendrite configuration. Such a chaotic tree-like pattern has been obtained through precipitating among the gelatin matrix which is spun coating on a glass substrate at room temperature. The weight percentage of the original gelatin solution is over-saturated. As the temperature decrease, the gelatin crystallizes and forms a natural fractal pattern in the thin film. The process parameters are changed and the hydraulic diameters of the fractal patterns are verified from 0.1  $\mu\text{m}$  to 23  $\mu\text{m}$ . Finally the authors used the biocompatible PDMS making blood vessel like capillary channels by the de-molding process of the soft lithography. The filling test of the PDMS fractal channel chip is done accordingly.

**Keywords**—gelatin; blood vessels; fractal; PDMS

## I. INTRODUCTION

Artificial blood vessels are important to the implant surgery subject to many irrecoverable damages of human organs. The material for the blood vessels should meet the requirement of good bio compatibility and long life time. Any polymer material extracted from the animal tissues or natural creatures seems more suitable to implant applications other engineering materials. One choice of them is gelatin which poses 18 kinds of amino acid and can be shaped into different geometries or patterns in the previous studies correlated with the weak microstructure strengthening and the selective stem cell culture [1-2]. In these prior arts, the gelatin micro patterns are very regular according to the designers' mask layouts hence far from the bio mimicking manner, e. g., the fractal patterns discussed in this paper. In other words, if we regard the gelatin as a material for making the artificial blood vessels to mimic the fractal-like capillary blood vessels, developing fractal gelatin patterns seems the first difficulty needed to be overcome.

Fractal patterns are commonly found during the re-crystallization process of over-saturated salty solution [3]. In NEMS-2011, the authors have ever chosen the gelatin aqueous solution dissolved with excess amount of a photo-sensitizer agent, potassium dichromate ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) [1] to occasionally generate the tree-like, fractal micro structures. One example is shown as Fig. 1 [4-5]. The classical weight percentage of the gelatin aqueous solution for generating the fractal gelatin is 10-20 wt%, with the matching amount of  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  as 5-15 wt%. In our prior art [4-5] the confinement effect mentioned by R. Feynman was investigated to influence the repetitive characteristics of the gelatin fractal patterns and its application to the design of micro mixers. In this paper, however, the authors would like to use gelatin fractal pattern to fabricate



Fig. 1. The gelatin fractal patterns in the  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ -gelatin collagen matrix [4].

some chaotic capillary channels for liquid transportation and even more as the promising artificial blood vessels in the future.

## II. FABRICATION AND EXPERIMENT

### A. How to Make the Fractal Gelatin

The gelatin solution needs gentle heating up to 50-60°C with proper mixing and bubble removing. Spin coating is accessed to spread the gelatin film on a glass substrate. The dispensing time of the gelatin gel on the substrate should be controlled as short as possible to avoid gelatin solidification before the uniform spin coating. The re-crystallization happens no sooner than the completion of spin coating, and proceeds for proper duration corresponding to different concentrations of gelatin solution.

A variety of fractal gelatin patterns corresponding to different process parameters are observed in this work. These process parameters are the spin-coating (500, 1000, 1500, 2000 rpm), the weight percentages of gelatin (10, 15, 20 wt%), and the weight percentages of  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  (5, 10, 15 wt%).

### B. Process Parameters of the Fractal Gelatin

In this work, the authors specifically evaluated the hydraulic diameters of the gelatin fractal patterns as the characteristic length. The hydraulic diameter  $D_h$  of the fractal gelatin according to different process parameters are shown Fig. 2. Each datum value of Fig. 2 is obtained by averaging at least 5 measured points from one gelatin sample. The error bar of each datum is also evaluated as well. The cross section of a fractal gelatin tree-like branch bumped and embedded in the

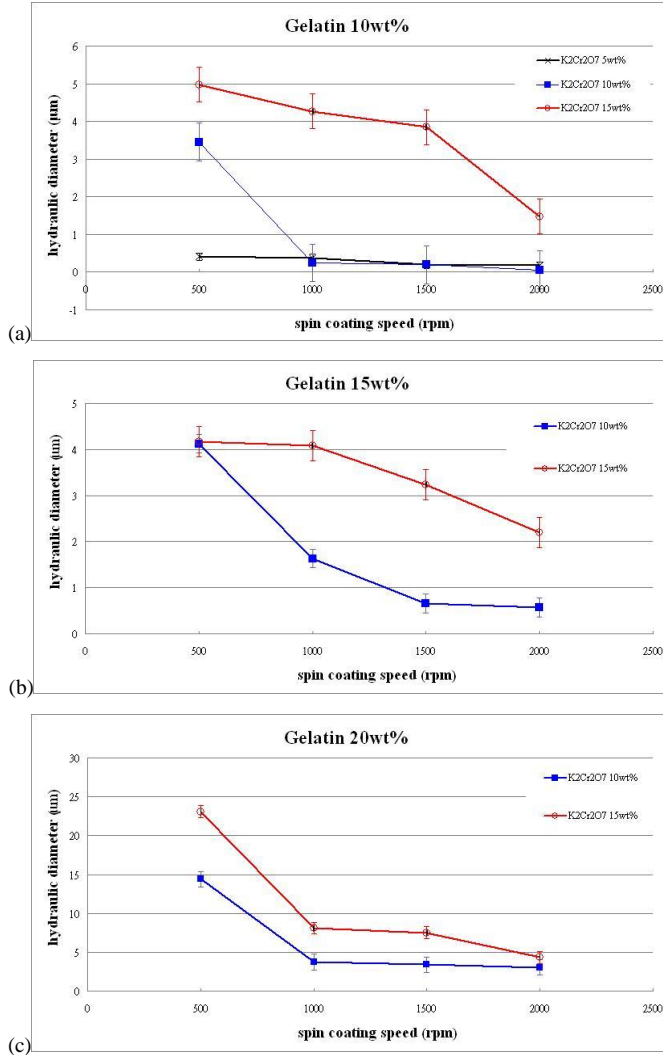


Fig. 2. Hydraulic diameters of the fractal gelatin versus spin coating speed with respect to different dichromate weight percentages: (a) in the 10 wt% gelatin; (b) in the 15 wt% gelatin; (c) in the 20 wt% gelatin.

gelatin film is regarded as a semi-ellipse herein. Therefore all the values of  $D_h$  are calculated by the elliptic cross section formulas as follows.

$$D_h = 4A_c / P \quad (1)$$

$$P \doteq \pi [3(a+b) - \sqrt{(3a+b)(a+3b)}] \quad (2)$$

$$A_c = \pi ab \quad (3)$$

where  $A_c$  and  $P$  denote the cross section area and the perimeter of the flow channel under investigation. The values of  $a$  and  $b$  in (2) and (3) denote the long semi-axis and the short semi-axis respectively of the ellipse. They are quantitatively determined from the scanned curve of the fractal gelatin patterns by SEM or the surface profiler (alpha-step 500). One example is shown in Fig. 3.

From Fig. 2, the fractal gelatin dimension or the hydraulic diameter globally decreases with the increasing coating speed and the lower wt% concentration of gelatin as well as dichromate salt. In Fig. 2(a), the finest hydraulic diameter of

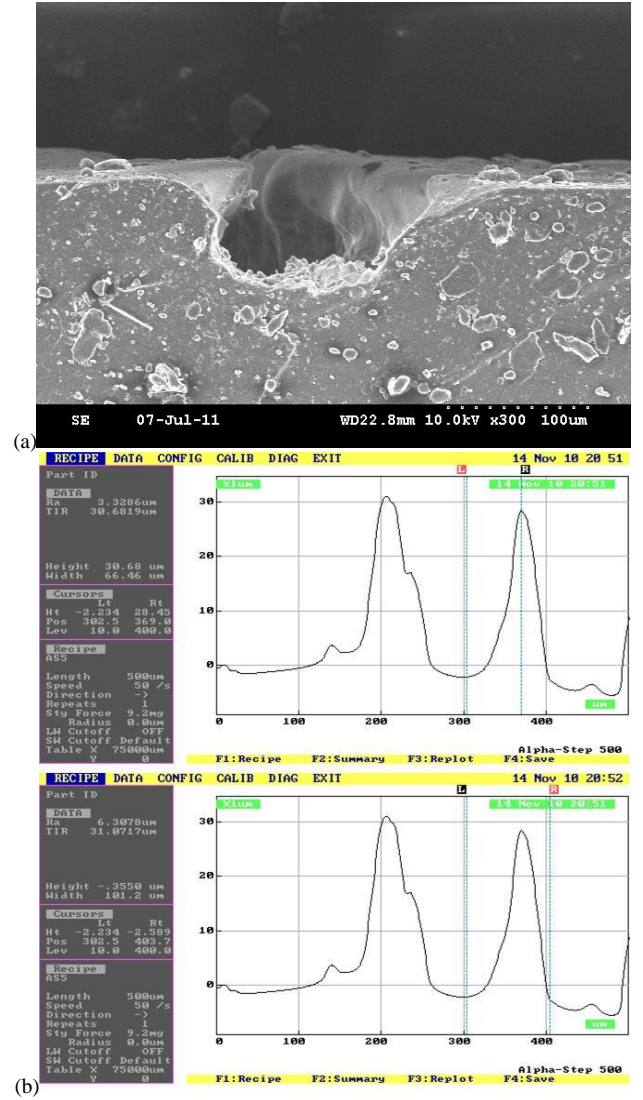


Fig. 3. The gelatin fractal patterns scanned by: (a) SEM; (b) surface profiler. The SEM of (a) is taken from a slice specimen cut from a PDMS block molded by the fractal gelatin. In (b) the height  $b$  is 30.68  $\mu\text{m}$  and the width  $2a$  is 101.2  $\mu\text{m}$ .

fractal gelatin branch is 0.1  $\mu\text{m}$  subject to 10 wt% dichromate in 10 wt% gelatin solution spun-coating at 2000 rpm.

Except the case of 10 wt% gelatin solution in Fig. 2(a), there's no fractal gelatin appeared with the dichromate wt% less than 5%. Additionally, the fractal gelatin dimension changing trend subject to lower wt% behaves more unpredictable in Fig. 2(a-b). Their hydraulic diameters also don't match with the general blood vessels. Therefore, the thicker case of 20 wt% gelatin solution in Fig. 2(c) is finally chosen as the candidate for the fractal pattern transfer to PDMS in the next section.

### C. Fractal Patterns Transfer to PDMS

Artificial blood vessels with chaotic dendrite tree shape mimicking the portal veins of livers were proposed by Ref. [6]. So far the authors could not find a proper method to fabricate the circular blood vessels directly by the gelatin material. An



easier approach is to regard the fractal gelatin as a mother template, and to use the PDMS de-molding technique to transfer the bumped fractal patterns into the concave fractal hollow channels in a PDMS block. The drawback of this method is that the cross section of the fractal channel is only semi-circular. But the elastic PDMS with large deformation capability could somewhat compromise this shortcoming. The PDMS process is shown in Fig. 4. The fabricated PDMS flow chip with fractal channels is shown in Fig. 5. The process parameters for the fractal gelatin are 20 wt% gelatin aqueous solutions with 15 wt%  $K_2Cr_2O_7$  subjected to 500 rpm spin coating speed. According to the process data in Fig. 2(c), the hydraulic diameter of this fractal channel is estimated to be 23  $\mu\text{m}$ .

#### D. Water Filling Test

The fabricated PDMS flow chip is performed with water filling to confirm the mechanical strength before the bio-compatible verification. The volumetric flow rate of the syringe pump is set as 5-40 mL/min. The authors observed the width change of the fractal channels under the optical microscope and summarized them in Table 1. The experiment setup and the OM pictures are shown in Fig. 6. As the flow rate is up to 30 mL/min, the width change of 7% is observed. The corresponding pressure drop across the fractal channel is calculated as 6.24 MPa by the Hagen-Poiseuille equation [7].

$$Q = uA_c = \frac{\Delta P \cdot \pi \cdot D_h^4}{128\mu L} \quad (4)$$

where  $Q$ ,  $u$ ,  $\mu$  denote the volumetric flow rate, flow speed, and viscosity of the fluid.  $L$  is the channel length of the flow channel.  $\Delta P$  is the pressure drop across the channel length  $L$  ( $=3.5$  mm from Fig. 5.)

This pressure drop  $\Delta P=6.24$  MPa is 4.46 times of the Young's modulus of PDMS, 1.4 MPa. Therefore the apparent channel deformation is reasonable. The flow speed of 59.3 m/s is far faster than the test speed of 2 mm/s for red blood cells [8], and even tremendously faster than the flow speed of 10  $\mu\text{m/s}$  for tumor cells in capillaries [6]. Therefore the PDMS fractal blood vessels are robust enough to be used in the general biomedical flow filling.

### III. CONCLUSION

In conclusion, the PDMS artificial blood vessel molded from fractal gelatin patterns has no damage issue subjected to MPa pressure loading so far. The characteristic hydraulic diameter of the chaotic micro channel ranges from 0.1  $\mu\text{m}$  to 23  $\mu\text{m}$  in this work. The potential applications of this fractal channel network include artificial blood vessels, cell culture attachment investigation, and chaotic micro mixers.

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the financial and travel support from the National Science Council of Taiwan with the project no. of NSC-98-2221-E-032-025-MY3.

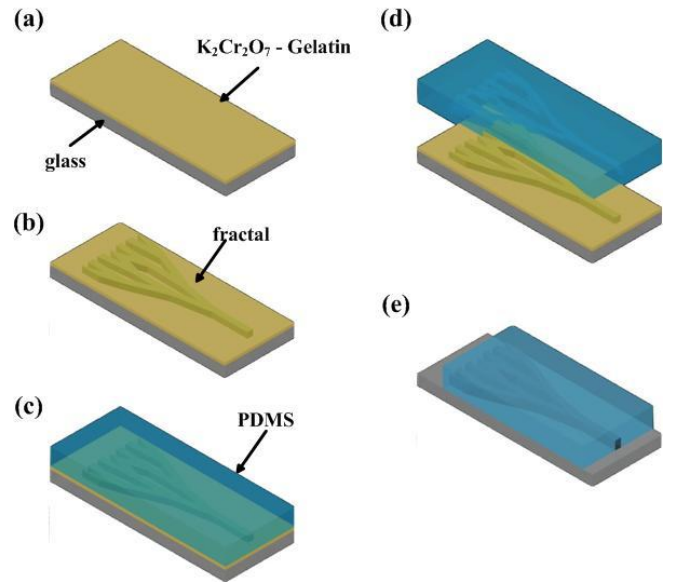


Fig. 4. Process flow of the PDMS fractal channels animating blood vessels. (a) Spin-coating the gelatin film with oversaturated potassium dichromate; (b) Fractal gelatin precipitation and UV exposure; (c) Dispensing PDMS; (d) PDMS de-molding; (e) A glass substrate bonded with the PDMS slide with fractal channel pattern.

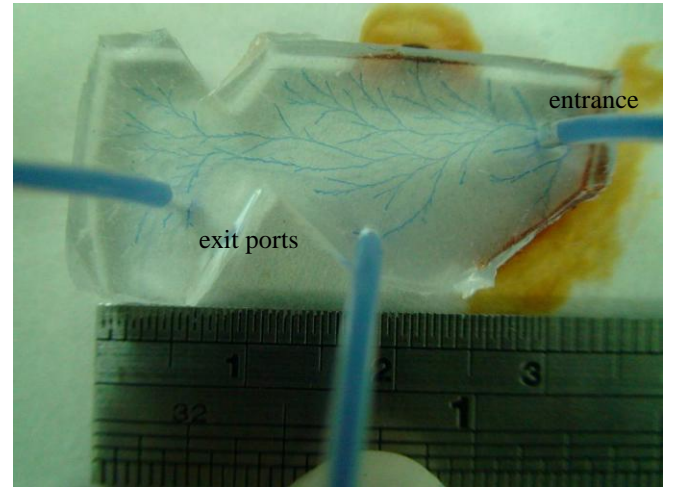


Fig. 5. A filling test of the PDMS fractal channel chip.

TABLE I. The testing results of the filling experiment on the PDMS chip.

Volumetric flow rate $Q$ (mL/min)	Flow speed $u$ (m/s)	Pressure difference $\Delta P$ (MPa)	Width change of fractal channels ( $L=0.035\text{m}$ ; $\mu=1.003\text{mPa} \cdot \text{s}$ )
5	10.6	1.19	None (width =100 $\mu\text{m}$ )
10	21.1	2.38	None (width =100 $\mu\text{m}$ )
15	31.7	3.57	None (width =100 $\mu\text{m}$ )
20	42.3	4.76	None (width =100 $\mu\text{m}$ )
25	52.9	5.95	None (width =100 $\mu\text{m}$ )
30	59.3	6.24	7% larger (width =107 $\mu\text{m}$ )
35	64.4	6.30	15% larger (width =115 $\mu\text{m}$ )
40	70.5	6.61	20% larger (width =120 $\mu\text{m}$ )

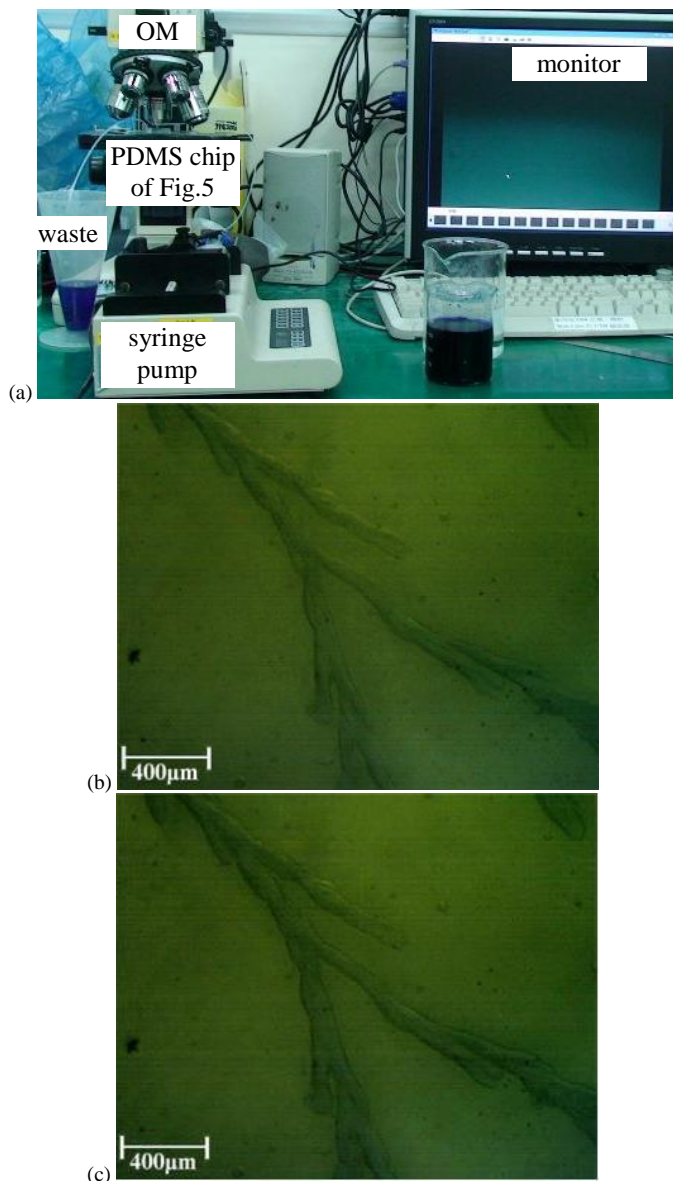


Fig. 6. Water filling experiment to the fractal channel in PDMS: (a) test setup; (b) channel without water filling; (c) channel filled with 35 mL/min water and the width changed with 15%.

#### REFERENCES

- [1] L.J. Yang, W.Z. Lin, T.Y. Yao, and Y.C. Tai, "Photo-patternable gelatin as protection layers in surface micromachinings," *Sensors and Actuators A*, vol. 103(1-2) pp. 284-290, 2003.
- [2] L.J. Yang and Y.C. Ou, "The micro patterning of glutaraldehyde(GA)-crosslinked gelatin and its application to cell-culture," *Lab on a Chip*, vol. 5, no. 9, pp. 979-984, 2005.
- [3] A. Mersmann, *Crystallization Technology Handbook*, 1<sup>st</sup> ed., Marcel Dekker, New York, Chapter 1, pp. 48-56, 1995.
- [4] L.J. Yang, C.T. Lee, P.H. Chen, and C.W. Hsu, "Confined fractal patterns in gelatin," The 6th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS-2011), art. no. 6017292, pp. 49-52, 2011.
- [5] A.F. Kao, L.J. Yang, F.W. Yeh, "Fractal grooves applied to passive micro-mixers," The 6th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS-2011), art. no. 6017315, pp. 142-145, 2011.

- [6] L.J. Yang, C.W. Hsu, and Y.C. Ou, "The minimum time estimation for initiating tumor-cell attachment," *Tech. Dig. of Transducers-2011*, Beijing, June 5-9, W3P.104, 2011.
- [7] M.J. Madou, *Fundamentals of Microfabrication- The Science and Miniaturization*, 2<sup>nd</sup> ed., CRC Press, Boca Raton, p. 565, 2002.
- [8] T. Secomb, R. Skalak, N. Ozkaya, and J.F. Gross, "Flow of axisymmetric red blood cells in narrow capillaries," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 163, pp. 405-423, 1986.

# Design of a Small Wankel Engine

Lung-Jieh Yang\*, Tsan-Hsiang Wang

\*Department of Mechanical and Electromechanical Engineering, Tamkang University, TAIWAN  
Ljyang@mail.tku.edu.tw

**Abstract**—This work presents a novel design of an ultra-small Wankel engine. With a device size of mm range and required power of mW, the rotation speed is theoretically calculated up to thousands of rpm. The PDMS MEMS process has been employed to make the Wankel engine planar and tiny. How to selecting the proper materials heterogeneously in the design stage of this engine is demonstrated herein.

**Keywords**—component; Wankel engine; energy harvest

## I. INTRODUCTION

Finding clean renewable energies has become a popular research topic in recent years. Using Stirling engine in harvesting the waste heat is one of the corresponding studies. Stirling engines are thermally driven by the mechanism of temperature difference and include the configurations of translational and rotary types. The rotary type Stirling engine invented by Felix Wankel in 1959 was also known as the Wankel engine. Wankel engines have several advantages over the traditional combustion piston engines in the past, for example, higher efficiency, lower vibration, and light weight [1-2].

In this work, MEMS machining method is used to fabricate an ultra-small Wankel engine for energy harvesting. Before the design of device manufacture, a theoretical discussion of the rotor dimension on the rotating speed of the Wankel engine is firstly done. Then a thermal resistance analysis is also addressed for selecting the proper materials and the corresponding MEMS processes. Silicon, glass, SU-8 resist, and PDMS are all considered as the device materials. The different working fluids inside the small Wankel engines are also proposed.

## II. DEVICE DESIGN AND FABRICATION

### A. Configuration of the Wankel Engine

The authors would like to manufacture an ultra-small Wankel engine by MEMS process here. Owing to the excuse that the structure of translational Stirling engine is complicated but the MEMS process is planar, so the rotary or the Wankel engine configuration is selected. However, the dimension and the materials for the engine should be assigned as well.

The housing inner wall of the Wankel engine has a mathematical form known as a trochoid or an epitrochoid shape [3-5]. The rotor is an eccentric rotor. The contour of the inner wall is shown in Fig. 1. The trajectory is depicted as the (x,y) coordinate in (1) and (2).

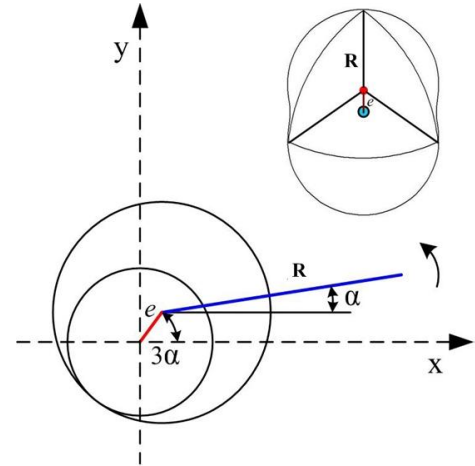


Fig. 1. The epitrochoid contour of Wankel engine.

$$x = R \cos(\alpha) - e \cos(3\alpha). \quad (1)$$

$$y = R \sin(\alpha) - e \sin(3\alpha). \quad (2)$$

where the angle  $\alpha$  can be regarded as follows assuming the constant rotating speed  $\omega$ ,

$$\alpha = \omega t. \quad (3)$$

The symbols  $R$  is the longest distance from the center circle to the periphery;  $e$  is the radius of the central circle.

Basically, the relative contour of Fig. 1 depends on  $e$  and  $R$  simultaneously. Herein, the authors fixed the ratio ( $e/R$ ) as 0.162, and discussed the proper value of  $R$  on the rotating speed of the rotor in the following.

### B. Rotation Speed of the Rotor

Ideally consider a circle disc with a radius of  $r_0$  shown in Fig. 2, and let it rotate with a speed of  $\omega$  above a supporting substrate with a gap of  $d$ . The viscous drag torque  $T$  could be taken as the integral around the disc area by the assumption of Newtonian fluid stress on the substrate as follows.

$$\begin{aligned} T &= \int_A (\text{stress}) (\text{area}) (\text{force\_arm}) \\ &= \int_A \mu \left( \frac{du}{dz} \right)_{\text{substrate}} dA \cdot r \\ &= \int_0^{r_0} \mu \frac{r\omega}{d} 2\pi r^2 dr \\ &= \frac{\pi \mu \omega r_0^4}{2d}. \end{aligned} \quad (4)$$

The power needed to overcome the drag torque  $T$  under the rotation speed  $\omega$  is shown below.

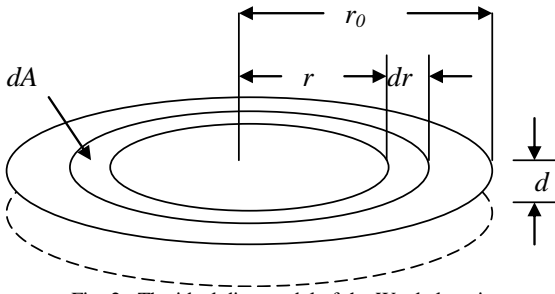


Fig. 2. The ideal disc model of the Wankel engine.

$$P = T\omega = \frac{\pi\mu\omega^2 r_0^4}{2d}. \quad (5)$$

As the authors applied the above power formula to the case of the Wankel engine, the rotating tip is not only rotating but also wobbling according to (1) and (2). So the averaged instantaneous tangential velocity  $r\omega$  in (4) should be replaced with  $\overline{r\omega}$  as follows.

$$\overline{r\omega} = r\omega\sqrt{1 + (3e/R)^2}. \quad (6)$$

and  $r^2$  in (4) should be replaced with  $\overline{r^2}$ .

$$\overline{r^2} = r^2 \left[ 1 + (e/R)^2 \right] \quad (7)$$

Finally, the modified power and the rotation speed are in the following.

$$\overline{P} = \frac{\pi\mu\omega^2 R^4}{2d} \sqrt{1 + (3e/R)^2} \left[ 1 + (e/R)^2 \right] \quad (8)$$

$$\overline{\omega} = \sqrt{\frac{2d\overline{P}}{\pi\mu R^4 \sqrt{1 + (3e/R)^2} \left[ 1 + (e/R)^2 \right]}}. \quad (9)$$

From (8) and (9), the required power  $P$  would be as small as possible when the rotor dimension  $R$  approaches to zero; the rotating speed  $\omega$  would also approach to infinity when the rotor dimension is as small as possible.

As a viable device for harvesting any infinitesimal waste heat  $P$ , the trend of making the rotor  $R$  smaller is beneficial to the success of the Wankel engine herein.

### C. Thermal Resistance Analysis

The proper choice of the heat conduction path in the Wankel engine is considered in this section. Then the required power  $P$  discussed in the previous section will be firstly estimated by this conduction heat transfer rate.

Here, the authors would like to compare the thermal conductivities of different internal working fluids in the central chamber of the engine which may be made of silicon and the PDMS substrates, respectively. These two kinds of substrate materials are of the most popular favor in MEMS area. The one-dimension, steady state, thermal conductivity equation (Fourier law) is shown as below.

$$q = kA \frac{\Delta T}{\Delta X}. \quad (10)$$

where  $q$  is heat transfer rate;  $k$  is thermal conductivity;  $A$  is cross section area;  $\Delta T$  is temperature difference;  $\Delta X$  is the assumed heat path length.

As people know well, the thermal resistance concept is beneficial to the first prediction of the proper heat path of heat conduction design problems. The thermal resistance  $R_T$  is defined as the temperature difference per unit heat transfer rate.

$$R_T = \frac{\Delta T}{q}. \quad (11)$$

Fourier law (10) and the definition (11) combine as below.

$$R_T = \frac{\Delta X}{kA}. \quad (12)$$

For the Wankel engine herein, there are two possible pathways for the thermal conduction heat to pass through. As shown in Fig. 3, the pathway (1) is along the periphery solid wall. The other pathway (2) is directly through the working fluid. For the sake of providing the required thermal power for rotating the engine rotor, the pathway (2) is of course the proper one.

Assume that  $\Delta X_1$  and  $\Delta X_2$  are the same;  $A_1 : A_2 = 1 : 10$ , and the rotor matter is negligible. If the pathway (2) is the favor one, the proper thermal resistance of  $R_{T,2}$  should be much smaller than  $R_{T,1}$  or expressed as the following inequality.

$$10 \gg \left( \frac{k_1}{k_2} \right). \quad (13)$$

If material (1) or the chamber engine is made of silicon and  $k_1 = 157$  W/mK, the thermal conductivity  $k_2$  of the proper working fluid inside the engine chamber should be much greater than 15.7 W/mK. Only some liquid metals meet this requirement. It will encounter difficulties as packaging liquid metals into the engine chamber and the working temperature must be high for melting the metals inside the chamber.

On the other hand, if the engine chamber is made of PDMS or glass, and  $k_1 = 0.16 \sim 1.38$  W/mK. Then the thermal conductivity  $k_2$  of the proper working fluid inside the engine chamber should be much greater than 0.016~0.138 W/mK. Water and even mercury meet this requirement. The corresponding thermal conductivities of the interested

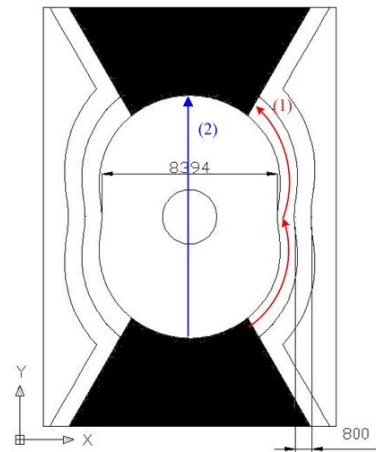


Fig. 3. Schematic diagrams of the small Wankel engine (unit:  $\mu\text{m}$ ).



materials discussed above are listed in TABLE I [6].

Fig. 4 conclusively shows a design of the Wankel engine with the side chamber and bottom material of PDMS and with the cap material of glass. The central rotor is made of SU-8 resist. The working fluid inside the chamber is supposed to be mercury.

Three dimensions of the small Wankel engines have been designed. The values of  $R$  are assigned as 4990, 2495, and 1248  $\mu\text{m}$ , respectively. In addition, there is an insulation groove has been designed to avoid the heat leak from the chamber in Fig. 4.

By the rotating speed  $\omega_1$  prediction of (9) and the conduction heat transfer rate ( $P$  is assumed to be converted from 40% of the heat conduction) of (10), the theoretical output data of the three engines with different rotor  $R$  are listed in TABLE II. The much faster  $\omega_2$  and  $\omega_3$  denote the cases that the gap between the rotor and the substrate is filled with water or air, respectively.

#### D. Fabrication Process

The soft lithography is selected as the fabrication technique for the small Wankel engine. A silicon mother mold is initially patterned by ICP etching and transfers to a PDMS chamber. This PDMS chamber block is bonded with a cover glass [7]. The whole processes are shown in Figs. 5-6.

The working fluid water or mercury should be filled into the chamber after the PDMS bonding. A filling hole is left in advance for the filling and the afterward sealing is done by epoxy gluing and parylene conformal coating [7]. One finished device filled with water is shown in Fig. 7. The functions of the Cr-Au electrodes made inside the chamber are two-folded. One function is as the thermal sensors for on-site monitoring the temperature field in the engine. The other function is as the joule heating source (or the thermal actuators) for adding so enough power into the engine as to push the rotor rotating.

#### E. Consideration of Testing Setup

The authors have applied the ultrasonic cleaner to shaking the rotor so as not to stick to the bottom surface of the PDMS chamber.

The rotor is detached from the substrate and of a little bit rotating around the center with several RPM. So far how to set up an ultrasonic shaking for the engine rotor is one concern for the successful experiment testing.

The temperature sensing function of the embedded electrodes have also been verified to monitor the temperature

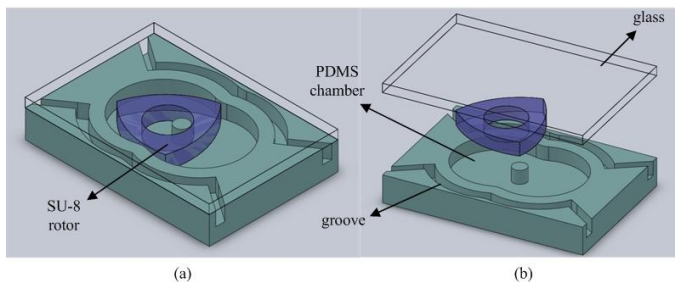


Fig. 4. Three dimensional diagram of the small Wankel engine.

TABLE I. THERMAL CONDUCTIVITIES OF MATERIALS [6]

	Silicon	PDMS	Glass	Hg	Air	Water
Thermal conductivity (W/mK)	157	0.16	1.38	8.34	0.024~0.026	0.33~0.68

TABLE II. PERFORMANCE DATA OF THE WANKEL ENGINE

$R$ ( $\mu\text{m}$ )	4990	2495	1248
$\Delta T$ (K)	70 (20 $\rightarrow$ 90 $^{\circ}\text{C}$ )		
$P$ (mW)	84.4 $\times$ 40% (working fluid: mercury)		
$\mu$ (N/s $\text{m}^2$ )	$1.4\times 10^{-2}$ (gap fluid: mercury)		
$\omega_1$ (RPM)	1,920	7,720	30,700
$\mu$ (N/s $\text{m}^2$ )	$5.1\times 10^{-4}$ (gap fluid: water)		
$\omega_2$ (RPM)	10,000	40,400	16,100
$\mu$ (N/s $\text{m}^2$ )	$2\times 10^{-5}$ (gap fluid: air)		
$\omega_3$ (RPM)	50,800	20,400	81,400
$d=18.75$ $\mu\text{m}$ ; $\Delta X=11607$ $\mu\text{m}$ ; $A=8394\times 200$ $\mu\text{m}^2$ ; $k=8.34$ W/mK			

change inside the chamber from the room temperature to the water boiling state. The Cr-Au metal is still fine as the resistive thermal detecting (RTD) material herein. However, how to combine the ceramic heating source with the fabricated engine to do the thermal testing is not easy since the thermal conductivity of PDMS wall is very small. The authors have tried to partially merge the fabricated PDMS small engine in the ultrasonic pool, and add heat directly into the hot side of the engine. Even though the temperature difference is up to 70 degree C, the engine rotor is only slightly shaking without apparent rotating. The authors re-calculated the output data of TABLE II by (9) and (10) with the working fluid changed from mercury to water. It's found that the theoretical rotating speed is around 2500 rpm subject to  $P=2$  mW. Since the water electrolysis from the Cr-Au electrodes during heating would generate non-condensed bubbles to retard the rotation of the engine. Using water as the working fluid is then not feasible herein. The experiment of packaging the testing mercury as the working fluid is still under developing. Moreover, a cooling end packaged with a heat pipe is revealed in Fig. 8 for promoting the condensation of this small Wankel engine.

### III. CONCLUSION

By the analysis of rotating speed and the thermal resistance of the possible designs of the ultra small Wankel engine in this study, the mm-size energy harvesting device is supposed to have thousands of RPM rotation speed subjected to mW power input. The fabrication process and the testing setup are also considered. Ultrasonic shaking is so far necessary to the testing for effectively levitating the center rotor without sticking issue. The authors also tried water as the working fluid inside the engine chamber and did not gain the successful result. The left choice of selecting mercury as the working fluid in PDMS engine chamber is still under way. The necessary packaging technique with conformal parylene is

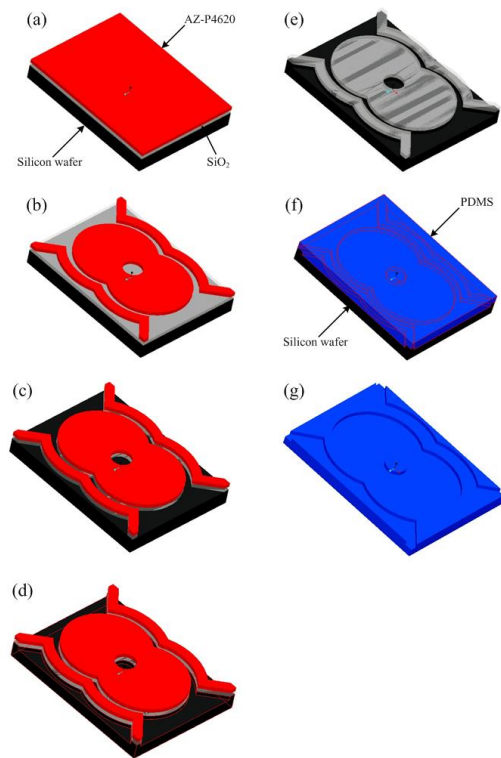


Fig. 5. Fabrication process for the PDMS chamber: (a) resist coating; (b) UV exposure and developing; (c) oxide opening; (d) ICP etching; (e) resist stripping; (f) dispensing PDMS; (g) PDMS demolding.

looked forward to avoiding mercury leakage. The Cr-Au electrodes designed as the thermal sensors and evaporator, a heat pipe installed at the cold end for condensation, are both hoped to augment the functionality of this small Wankel engine as well in the future.

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the financial and travel support from the National Science Council of Taiwan with the project no. of NSC-98-2221-E-032-025-MY3. The technical helps from Prof. Shung-Wen Kang of Tamkang University and Dr. Yu-Cheng Ou of National Applied Research Laboratories are also highly acknowledged.

#### REFERENCES

- [1] P. Jin, K. Jiang and N. Sun, "Microfabrication of ultra-thick SU-8 photoresist for micro engines," *Proceeding of SPIE*, vol. no. 4979, pp. 105-110, 2003.
- [2] C.H. Lee, K.C. Jiang, P. Jin, and P.D. Prewett, "Design and fabrication of a micro Wankel engine using MEMS technology," *Microelectronic Engineering*, vol. 73-74, pp. 529-534, 2004.
- [3] R.F. Ansdale, *The Wankel RC engine: design and performance*, 1<sup>st</sup> edition, South Brunswick, New Jersey, 1969.
- [4] D.E. Cole, "The Wankel engine," *Scientific American*, vol. 227, no. 2, pp. 14-23, 1972.
- [5] K.C. Weston, "Computer simulation of a Wankel rotary engine analysis and graphics," *Proceeding of the Conference of the Society for Computer Simulation*, pp. 213-216, 1986.
- [6] F. Kreith and M.S. Bohn, *Principles of Heat Transfer*, sixth edition, Thomson, .

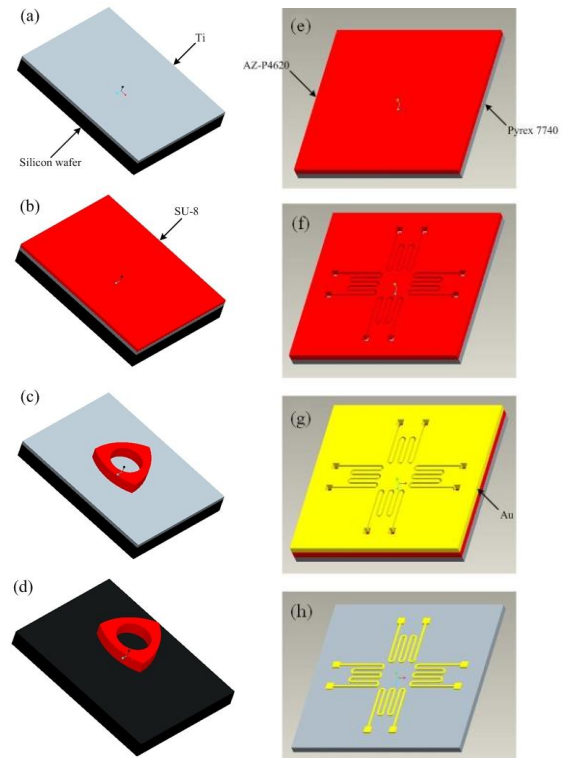


Fig. 6. Fabrication process for the rotor: (a) evaporating Ti; (b) SU-8 coating; (c) UV exposure and developing; (d) detaching SU-8 rotors from the substrate; Process for the electrodes: (e) resist coating; (f) UV exposure and developing; (g) evaporating the electrode metal film; (h) lift off process.

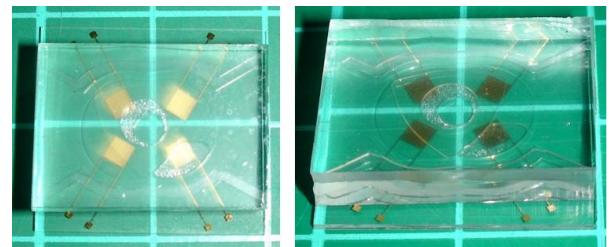


Fig. 7. A fabricated small Wankel engine (R=4990 $\mu$ m).

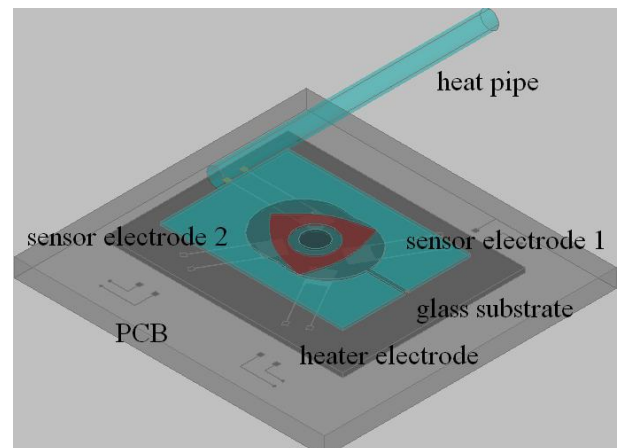


Fig. 8. The modified package of the small Wankel engine.

- [7] L.J. Yang and T.Y. Lin, "A PDMS-based thermo-pneumatic micropump with Parylene inner walls," *Microelectronic Engineering*, vol. 88, pp. 1894-1897, 2011.



無研發成果推廣資料

98 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：楊龍杰			計畫編號：98-2221-E-032-025-MY3				
計畫名稱：20 公分翼展以下之拍翼式微飛行器的縮小化與減重研究							
成果項目			量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）
			實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數(含實際已達成數)	本計畫實際貢獻百分比		
國內	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	6	3	100%		
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	2	1	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（本國籍）	碩士生	19	9	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	1	1	100%		
		專任助理	0	0	100%		
國外	論文著作	期刊論文	9	3	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	13	3	100%		
		專書	1	0	100%	章/本	
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	1	1	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（外國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		

<p>其他成果</p> <p>(無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)</p>	<p>(1)完成國科會五十學之旅等四項活動，總人次約 300 人，參與人員背景包含各級學校學生與教師，對於爾後推展國內拍翼機發展極有幫助。財</p> <p>(2)支援東森財經新聞台拍攝《科學成就之旅》科普節目：「現代魯班」(已於 2009 年 10 月 11 日 播 出 ； <a href="http://blog.nownews.com/scientist/textlist.php">http://blog.nownews.com/scientist/textlist.php</a>)。</p> <p>(3)協辦 2009-2012 年之全國無人飛機設計比賽—拍翅翼組之賽事(地點分別在淡江、成大與勤益科大)，每年均有 15-20 隊參賽。</p> <p>(4)2009 年 12 月 12 日於中華科技大學，支援航太學門成果發表之現場實體成果飛行展示。</p> <p>(5)參加 2010 年台北國際機器人展，負責 60 組的民間人士參與 DIY 製作教學推廣。</p> <p>(6)接受工程科技 E-paper 第 107-108 兩期之專訪。</p> <p>(7)接受精密機械研發中心(PMC)於機器人產業情報網站之訪問。</p> <p>(8)支援貴會【師法自然】專輯承辦單位之專訪與 DVD 拍攝(已於 2012 年 8 月 30 日大愛電視台播出)。</p>
---	--

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科教處計畫加填項目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與（閱聽）人數	0	

# 國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

## 1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

☒達成目標

☐未達成目標（請說明，以 100 字為限）

☐實驗失敗

☐因故實驗中斷

☐其他原因

說明：

## 2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文：☒已發表 ☐未發表之文稿 ☐撰寫中 ☐無

專利：☒已獲得 ☐申請中 ☐無

技轉：☐已技轉 ☒洽談中 ☐無

其他：（以 100 字為限）

## 3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

(1)學術成就：發現人工微拍翼機之傾斜 8 字拍翼流固耦合現象，分別發表在 Journal of Aircraft, Applied Mechanics and Materials, Journal of Applied Science and Engineering 等國際期刊，與 AIAA 年會、Transducers-2011、ICTAM-2012 等國際會議。

(2)技術創新：以妥善調整剛性之可撓翼面結構，配合單自由度上下拍動之簡易四連桿機構，結合為傾斜 8 字拍翼，並獲准 2011 年美國專利 US 8,033,499 B2。

(3)社會影響：協助拍攝多次科普節目 DVD，於大愛與東森電視台播出，並舉辦多次暑期科普營隊，邀集學生與家長參加，讓社會大眾了解仿生拍翼與微飛行器科技。